ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 54418.12.1 — 2011 (МЭК 61400-12-1:2005)

Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 12-1

Измерение мощности, вырабатываемой ветроэлектрическими установками

IEC 61400-12-1: 2005 Wind turbines — Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (MOD)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2013

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. N 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Открытым акционерным обществом Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (ОАО «НИИЭС») на основе собственного аутентичного перевода стандарта, указанного в пункте 4, ТК 330 «Процессы, оборудование и энергетические системы на основе возобновляемых источников энергии»

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 39 «Энергосбережение, энергетическая эффективность, энергоменеджмент»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2011 г. № 379-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту МЭК 61400-12-1 «Установки ветроэлектрические. Часть 12-1. Измерения показателей мощности ветроэлектрических установок» (IEC 61400-12-1: 2005 «Wind turbines — Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines»), при этом:

- дополнительные слова (фразы, показатели и их значения), учитывающие потребности национальной экономики Российской Федерации и/или особенности российской стандартизации, выделены курсивом.

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5 — 2004 (пункт 3.5).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации, сведения о которых приведены в обязательном приложении ДА.

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячно издаваемых информационных указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомления и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет

© Стандартинформ, 2013

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 . . . 3
5 Подготовка к выполнению испытаний . . . 6
5.1 Ветроэлектрическая установка и ее подключение . . . 6
5.2 Испытательная площадка . . . 6
5.2.1 Выбор места для размещения метеорологической мачты . . . 7
5.2.2 Сектор измерений . . . 7
5.2.3 Поправочные коэффициенты и погрешности на топографическое искажение воздушного потока . . . 8
6 Оборудование для испытаний . . . 8
6.1 Измерение электрической мощности . . . 8
6.2 Измерение скорости ветра . . . 9
6.3 Измерение направления ветра . . . 10
6.4 Измерение плотности воздуха . . . 10
6.5 Частота вращения и угол установки лопасти . . . 10
6.6 Состояние поверхности лопастей . . . 10
6.7 Система управления ветровой установкой . . . 10
6.8 Система сбора данных . . . 10
7 Методика измерений . . . 10
7.1 Общие положения . . . 10
7.2 Работа ветровой установки . . . 11
7.3 Сбор данных . . . 11
7.4 Выбраковка данных . . . 11
7.5 Исправление данных . . . 12
7.6 База данных . . . 12
8 Аналитические результаты . . . 12
8.1 Нормализация данных . . . 12
8.2 Построение графика выходной мощности . . . 13
8.3 Годовая выработка энергии (AEP) . . . 13
8.4 Коэффициент преобразования энергии . . . 14
9 Форма отчетности . . . 15
Приложение A (обязательное) Оценка препятствий на площадке испытаний . . . 25
Приложение B (обязательное) Оценка местности на площадке испытаний . . . 28
Приложение C (обязательное) Методика калибровки площадки . . . 29
Приложение D (обязательное) Оценка погрешности измерений . . . 31
Приложение E (справочное) Теоретические основы определения погрешностей измерений методом бинов . . . 33
Приложение F (обязательное) Калибровка чашечного анемометра . . . 47
Приложение G (обязательное) Установка оборудования на метеорологической мачте . . . 54
Приложение H (обязательное) Эксплуатационные испытания ветроустановок малых и средних мощностей . . . 61
Приложение I (обязательное) Классификация анемометров . . . 63
Приложение J (справочное) Оценка чашечных анемометров . . . 65
Приложение K (справочное) Сравнение характеристик анемометров, используемых для проведения испытаний . . . 73
Приложение ДА (обязательное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам Российской Федерации, использованным в настоящем стандарте в качестве нормативных ссылок . . . 74

Введение

Настоящий стандарт «Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 12-1. Измерение мощности, вырабатываемой ветроэлектрическими установками» разработан с целью создания единого метода, обеспечивающего стабильность, точность и возможность воспроизведения измерений и анализа показателей мощности ветроэлектрических установок. Стандарт предназначен для применения:

производителями ветроэлектрических установок для обеспечения строго установленных требований к показателям мощности и/или системе соответствия требованиям;

покупателями ветроэлектрических установок для задания требований к рабочим характеристикам;

организациями, эксплуатирующими ветроэлектрические установки, для проверки эксплуатационных характеристик мощности новых или отремонтированных агрегатов;

проектировщиками или специалистами, осуществляющими надзор, для точного и достоверного определения соответствия эксплуатационных характеристик мощности ветроэлектрических установок требованиям нормативных документов или задания требований к новым или модифицированным установкам.

Данный стандарт является руководящим нормативным документом для выполнения измерений, анализа полученных данных и формирования отчетности по испытаниям показателей мощности ветроэлектрических установок.

Стандарт рекомендуется применять при нормативно-правовом обеспечении производства, проектировании строительства, осуществлении надзора, эксплуатации и ликвидации ветроэлектрических установок.

Технически выверенные методы измерений и анализа, рекомендуемые в данном стандарте, должны применяться всеми сторонами, чтобы обеспечить постоянное и строгое соответствие требованиям безопасности и охраны окружающей среды при создании и эксплуатации ветроэлектрических установок.

В данном стандарте установлены методы измерений и формирования отчетности, которые обеспечивают получение точных и воспроизводимых результатов. При этом пользователь стандарта должен учитывать те различия, которые возникают вследствие большого числа вариаций в распределениях ветра и его турбулентности, а также используемого критерия отбора данных. Поэтому пользователь стандарта должен рассмотреть влияние данных различий и критерия отбора данных на цели проводимого испытания до начала выполнения измерений характеристик мощности.

Методика измерения характеристик мощности тесно связана с точностью измерения скорости ветра и параметров атмосферы. Стандарт рекомендует применение чашечных анемометров для измерения скорости ветра. Этот прибор дает устойчивые показания и является общепризнанным для осуществления испытаний такого типа. Вместе с тем, применение соответствующих методов калибровки в аэродинамической трубе не гарантирует, что в реальных условиях анемометр не будет реагировать на флуктуации вектора скорости (по величине и по направлению), и его показания будут идентичны показаниям, измеренным в трубе.

Инструменты и методики для классификации чашечных анемометров приведены в приложениях I и J. Следует обратить внимание на то, что полученные результаты испытаний зависят от типа анемометра и его характеристик. Поэтому необходимо обратить особое внимание на выбор анемометра.

Настоящий стандарт разработан с учетом требований, обеспечивающих:

- безопасность жизни и здоровья граждан, государственного и муниципального имущества; охраны окружающей среды, жизни и здоровья животных;

- безопасность при эксплуатации и техническом обслуживании ветровых электростанций и ветроэлектрических установок, соответствующих Федеральному закону «О техническом регулировании», Федеральному закону «Об электроэнергетике».

Настоящий стандарт устанавливает необходимый минимальный набор требований, необходимых при проведении исследований вырабатываемой мощности ветроэлектрических установок (ВЭУ) и формировании технической отчетной документации.

Любое из установленных требований данного стандарта может быть изменено, если надлежащим образом будет доказано, что при этом требуемый уровень безопасности и точности выполнения измерений характеристик мощности ВЭУ обеспечен. Соблюдение данного стандарта не является основанием, освобождающим любое физическое или юридическое лицо (вне зависимости от форм собственности) от необходимости использования других применимых норм и регламентов.

Примечание — Дополнение оригинального текста выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 1.5.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 12-1

Измерение мощности, вырабатываемой ветроэлектрическими установками

Renovable power engineering. Wind power engineering.
Wind turbines. Power performance measurements of electricity producing wind turbines

Дата введения — 2012 — 07 — 01

1 Область применения

Данный стандарт устанавливает методы измерения выходных электрических характеристик отдельно взятой ветроэлектрической установки (ВЭУ) и применяется для проведения испытаний ветроэлектрических установок всех типов и размеров, работающих параллельно с энергетической системой. Кроме того, данный стандарт описывает методы, используемые для определения электрических характеристик малых ВЭУ, подключенных как к сети потребления и распределения мощности, так и к системе накопителей электрической энергии. Данные методы могут быть использованы в равной степени как для оценки рабочих характеристик конкретных ВЭУ, размещенных на конкретных площадках, так и при обобщающих сравнениях между различными моделями ВЭУ или различными условиями окружающей среды в реальных условиях размещения.

Характеристики выходной мощности ветроэлектрических установок определяются на основе графика выходной мощности и расчетной годовой выработки энергии (AEP). График измеренной выходной мощности строится на основе собранных синхронных измерений скорости ветра и генерируемой мощности на испытательной площадке в течение периода времени, достаточного для образования статистически достоверной базы данных в установленном диапазоне скоростей ветра в условиях изменения ветрового режима и параметров атмосферы. AEP рассчитывается путем наложения графика выходной мощности на базовое частотное распределение скорости ветра в предположении 100 %-ной готовности ветроэлектрической установки.

В стандарте описан метод выполнения измерений, для которого требуется полученные зависимости выходной мощности и вычисленные значения выработанной энергии дополнить комплексными оценками источников погрешностей и их суммарным влиянием.

Настоящий стандарт должен использоваться совместно со стандартами, на которые настоящий стандарт ссылается и которые перечислены в разделе 2.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 1983 — 2001 Трансформаторы напряжения. Общие технические условия

ГОСТ 4401 — 81 Атмосфера стандартная. Параметры

ГОСТ 7746 — 2001 Трансформаторы тока. Общие технические условия

ГОСТ 14014 — 91 Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний.

ГОСТ 24855 — 81 Преобразователи измерительные тока, напряжения, мощности, частоты, сопротивления аналоговые. Общие технические условия

IEC 61400-1:2010 Системы турбогенераторные ветровые. Часть 1. Требования к конструкции

Издание официальное

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим ежемесячно издаваемым информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяют в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

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

3.1**аэродинамическое препятствие** (obstacle): Предмет, который препятствует свободному движению и создает искажение течения воздушного потока, например здания и деревья.

3.2 **ветровой режим:** Совокупность измеренных и вычисленных параметров ветра: скорости, направления, турбулентности, их экстремальных значений и продолжительности, характеризующих состояние воздушного потока на заданной высоте на испытательной площадке.

3.3 **высота оси (ВЭУ)** (hub height (wind turbines) Z_{hub}: Высота центра ометаемой площади ветроколеса ВЭУ над поверхностью земли (3.13, ометаемая площадь).

Примечание — Для ветроэлектрической установки с вертикальной осью вращения высота оси ветроколеса измеряется от поверхности земли до экваториальной плоскости ветроколеса.

3.4 **годовая выработка энергии (AEP)** (annual energy production): Полный объем произведенной ВЭУ электрической энергии в течение одного года, определенный на основе измеренной выходной мощности и различных базовых плотностей распределения скорости ветра на высоте оси ветроколеса в предположении 100 %-ной готовности ВЭУ.

3.5 **искажение течения** (flow distortion): Изменения в течении воздушного потока, вызываемые аэродинамическими препятствиями, рельефом местности или другими ВЭУ, которые приводят к отклонениям измеренной величины скорости от величины скорости в невозмущенном воздушном потоке, а также к существенной погрешности.

3.6 **испытательная площадка** (test site): территория, включающая место установки ВЭУ и окрестности, при проведении измерений мощности.

3.7 **постоянная расстояния** (distance constant): Характеристика времени успокоения анемометра, определяемая как длина пути воздушного потока, протекающего через прибор, при котором показание прибора составит 63 % от полного значения измеренной входной величины скорости ветра.

3.8 **график измеренной выходной мощности** (measured power curve): Табличные и графические представления замеренной, исправленной и нормализованной полезной выработанной мощности ВЭУ в функции измеренной скорости ветра, при соответствии строго определенной методике измерений.

3.9 **коэффициент преобразования энергии ветра** (power coefficient): Отношение полезной электрической мощности, выработанной ВЭУ, к мощности набегающего невозмущенного воздушного потока по ометаемой площади ветроколеса.

3.10 **метод бин** (method of bins): Способ уменьшения числа измеренных данных на основе группировки измеренных значений некоторого параметра в интервалах скоростей ветра (бинах).

Примечание — Для каждого бина рассчитывается среднее значение параметра внутри каждого бина на основе записанного числа наборов данных или выборок и их подсчитанной суммы.

3.11 **набор данных** (data set): Совокупность данных, полученных выборкой в течение непрерывного периода.

3.12 **номинальная мощность** (rated power): Величина мощности, объявленная производителем и соответствующая указанным режимам эксплуатации устройства или оборудования.

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

3.13 **ометаемая площадь** (swept area): Площадь проекции поверхности, которую описывает ветроколесо за один полный оборот, на плоскость, перпендикулярную к направлению скорости ветра. Для качающихся ветроколес предполагается, что ветроколесо остается перпендикулярным к низкооборотному валу. Для ветроэлектрических установок с вертикальной осью площадь вращения ветроколеса проецируется на вертикальную плоскость.

3.14 **период измерений** (measurement period): Интервал времени, в течение которого для проверки величины вырабатываемой мощности собрана статистически достоверная база совокупных данных.

3.15 **погрешность измерений** (uncertainty in measurement): Параметр результата измерения, который характеризует рассеивание значений и которое достоверно может быть приписано измеряемой величине.

3.16 **полезная активная электрическая мощность** (net active electric power): Величина электрической мощности, передаваемой во внешнюю электрическую сеть.

3.17 **производительность** (power performance): Мера способности ВЭУ вырабатывать электрическую энергию.

3.18 **сектор измерений** (measurement sector): Совокупность направлений ветра, по которым собираются данные для построения графика выходной мощности.

3.19 **сложный ландшафт** (complex terrain): Окружающий ландшафт, который имеет существенные изменения рельефа и препятствия на поверхности земли, которые могут вызвать искажение воздушного потока.

3.20 **стандартная погрешность** (standard uncertainty): Погрешность результата измерения, выраженная как среднее квадратическое отклонение.

3.21 **точность** (accuracy): Близость совпадения результата измерения и истинного значения измеряемой величины.

3.22 **угол установки лопасти** (pitch angle): Угол между линией хорды в определенной радиальной точке лопасти (обычно 100 % от радиуса лопасти) и плоскостью вращения ветроколеса.

3.23 **экстраполированный график выходной мощности** (extrapolated power curve): График вырабатываемой мощности, достроенный в интервале скоростей ветра от наибольшей измеренной скорости ветра до скорости ветра отключения.

4 Обозначения и сокращения

Обозначения приведены ниже

Обозначение	Наименование величины	Единица величины
A	площадь, ометаемая ветроколесом	[м^2]
A	*площадь одной чашечки анемометра*	[м^2]
AEP	годовое производство энергии	[Вт·ч]
B	барометрическое давление	[Па]
B_{10min}	измеренное давление воздуха, усредненное за 10 мин	[Па]
C_h	коэффициент насадки трубки Пито	
$C_{P,i}$	коэффициент преобразования энергии в бине i	
C_{QA}	коэффициент обобщенного аэродинамического момента вращения ротора анемометра	
C_T	*коэффициент удельного аэродинамического сопротивления*	
c	коэффициент чувствительности по параметру (частная производная)	
$c_{B,i}$	коэффициент чувствительности давления воздуха в бине i	[Вт/Па]
$c_{d,i}$	коэффициент чувствительности системы сбора данных	
c_{index}	коэффициент чувствительности индексного параметра	
$c_{k,i}$	коэффициент чувствительности k-го компонента в бине i	
$c_{m,i}$	коэффициент чувствительности поправки на плотность воздуха в бине i	[Вт м^3/кг]
$c_{T,i}$	коэффициент чувствительности температуры воздуха в бине i	[Вт/К]

$c_{V\ i}$	коэффициент чувствительности скорости в бине *i*	[Вт с/м]
C_P	*коэффициент преобразования энергии ветра*	
D	диаметр ветроколеса ВЭУ	[м]
D_e	эквивалентный диаметр	[м]
D_n	диаметр ветроколеса соседней ВЭУ	[м]
d	диаметр метеорологической мачты трубчатой конструкции	[м]
$F(V)$	интегральная функция распределения вероятности Релея для скорости ветра	
f_j	вероятность появления скорости ветра в интервале скорости ветра	
H	высота оси ветроколеса	[м]
h	высота препятствия минус смещения нуля	[м]
I	момент инерции ротора чашечного анемометра	кгм^2
k	номер класса	
k_b	поправочный коэффициент на запирание аэродинамической трубы	
k_c	коэффициент калибровки аэродинамической трубы, определенный заранее	
k_t	коэффициент поправки на аэродинамическую трубу для других труб (используется только при оценке погрешности)	
k_ρ	поправка для плотности воздуха, учитывающая влияние его влажности	
$K_{B\ t}$	чувствительность барометра	
$K_{B\ s}$	поправка на измерения барометра	
$K_{T,t}$	чувствительность датчика температуры	
$K_{T,s}$	поправка на измерения датчика температуры	
$K_{T,d}$	поправка на выборку датчика температуры	
$K_{p,t}$	чувствительность датчика давления	
$K_{p,s}$	поправка на измерения датчика давления	
$K_{p,d}$	поправка на выборку датчика давления	
kA, kB, kS	типы классов	
L	расстояние между метеорологической мачтой и осью башни эквивалентной ветроустановки с горизонтальной осью вращения	[м]
L	расстояние между опорами трехопорной метеорологической мачты	[м]
L_e	расстояние между ВЭУ или метеорологической мачтой и аэродинамическим препятствием	[м]
L_n	расстояние между ВЭУ или метеорологической мачтой и соседней работающей ВЭУ	[м]
l_h	высота препятствия	[м]
l_w	ширина препятствия	[м]
M	количество компонентов погрешности в каждом бине	
M_A	число компонентов погрешности категории А	
M_B	число компонентов погрешности категории В	
N	число бинов	
N_h	расчетное количество часов в году, равное 8760	
N_i	число наборов данных за 10-минутный период в бине *i*	
N_j	число отношений скоростей ветра в бине направления ветра *j*	
$N_{i,j}$	число наборов данных графика выходной мощности для бина скорости ветра *i* и бина направления ветра *j*	
n	число выборок в заданном интервале	
n	показатель степени в законе распределения скоростей ветра (n = 0,14)	
P_0	аэродинамическая проницаемость препятствия (0 — для сплошного тела, 1— препятствие отсутствует)	
P_i	нормализованная и усредненная выработанная мощность в бине *i*	[Вт]

P_n	нормализованная выработанная мощность	[Вт]
$P_{n,\ i,\ j}$	нормализованная выработанная мощность по набору данных *j* в бине *i*	[Вт]
P_{10min}	измеренная мощность, усредненная за 10 мин	[Вт]
P_w	давление пара	[Па]
Q_A	аэродинамический момент	[Нм]
Q_f	момент трения	[Нм]
R	расстояния до центра трубчатой мачты	[м]
R	*радиус расположения чашечек анемометра*	[*м*]
R_0	газовая постоянная для сухого воздуха [287,05]	[Дж/кгК]
R_w	газовая постоянная для водяного пара [461,5]	[Дж/кгК]
r	коэффициент корреляции данных	
s	составляющая погрешности категории *A*	
s_A	стандартная погрешность категории *A* при серийных замерах скоростей воздушного потока в аэродинамической трубе	
$s_{k,\ i}$	стандартная погрешность категории *A* *k*-го компонента в бине *i*	
s_i	стандартная погрешность категории *A* в бине *i*	
$S_{P,\ i}$	стандартная погрешность мощности категории *A* в бине *i*	
$S_{W,\ i}$	стандартная погрешность категории *A* в бине *i*, вызванная климатическими изменениями	
$S_{\alpha,\ j}$	среднее квадратичное отклонение отношений скоростей ветра в бине направления ветра *j*	
S	специальный класс	
T	абсолютная температура	[K]
TI	интенсивность турбулентности	
T_{10min}	измеренная абсолютная температура воздуха, усредненная за 10 мин	[K]
t	аэродинамическая плотность мачты	
t	время	[с]
U	средняя горизонтальная скорость ветра	[м/с]
U_d	уменьшение скорости ветра по центральной линии набегающего потока	[м/с]
U_{eq}	эквивалентная горизонтальная скорость ветра	[м/с]
U_h	скорость невозмущенного воздушного потока на высоте *h* аэродинамического препятствия	
U_i	скорость ветра в бине *i*	[м/с]
U_t	пороговая скорость ветра	[м/с]
$\vec{U}$	вектор скорости ветра	
u	продольная составляющая вектора скорости	[м/с]
u	составляющая погрешности категории B	
u_{AEP}	суммарная стандартная погрешность при производстве энергии	[Вт·ч]
$u_{B,i}$	суммарная погрешность давления в бине *i*	
$u_{c,i}$	суммарная погрешность мощности в бине *i*	
u_i	суммарная погрешность категории B в бине *i*	
u_{index}	стандартная погрешность индексируемого параметра	
$u_{k,\ i}$	стандартная погрешность *k*-го компонента в бине *i*	
$u_{m,\ i}$	стандартная погрешность на поправку к плотности воздуха в бине *i*	[кг/м^3]
$u_{P,\ i}$	стандартная погрешность категории B в бине *i* для определения мощности	[Вт]
$u_{V,\ i}$	стандартная погрешность категории B в бине *i* при определении скорости	[м/с]
$u_{T\ i}$	стандартная погрешность на температуру в бине *i*	[K]

$u_{\alpha, i, j}$	суммарная стандартная погрешность калибровки	[м/с]
	площадки в бине скорости ветра *i* и бине направления ветра *j*	[м/с]
V	скорость ветра	[м/с]
V_{ave}	годовая средняя скорость ветра на высоте оси ветроколеса	[м/с]
$V_{control}$	скорость ветра по контрольному анемометру	[м/с]
$V_{control_corr}$	скорость ветра по контрольному скорректированному анемометру	[м/с]
V_i	нормализованная и усредненная скорость ветра в бине *i*	[м/с]
V_n	нормализованная скорость ветра	[м/с]
$V_{n, i, j}$	нормализованная скорость ветра набора данных *j* в бине *i*	[м/с]
V_{10min}	измеренная скорость ветра, усредненная за 10 мин	[м/с]
v	поперечная составляющая вектора скорости воздушного потока	[м/с]
$\overline{v}$	средняя скорость набегающего воздушного потока	[м/с]
w	вертикальная составляющая вектора скорости воздушного потока	[м/с]
w_i	весовая функция, определяющая границы отклонений	
X_k	параметр, усредненный за период, предшествовавший испытаниям	
X_{10min}	параметр, усредненный за 10 мин	
x	расстояние между затеняющим аэродинамическим препятствием и ВЭУ или метеорологической мачтой, измеренное по потоку	[м]
z	высота над уровнем земли	
z_0	шероховатость поверхности	[м]
α	величина угла возмущенного сектора	[град]
α	угол атаки	[град]
α_i	поправочный коэффициент (отношение скорости ветра в месте расположения ветроколеса к скорости ветра на метеорологической мачте)	
ΔU_z	влияние препятствия на различие в скоростях ветра	[м/с]
Δp_{ref}	*средняя величина перепада давления*	*[Па]*
$\varepsilon_{max, i}$	максимальное отклонение для любого бина скорости ветра *i* в диапазоне скоростей ветра	м/с
k	постоянная Кармана, равная 0,4	
λ	отношение скоростей	
ρ	коэффициент корреляции	
ρ	плотность воздуха	[кг/м^3]
ρ_0	базовая плотность воздуха	[кг/м^3]
ρ_{10min}	вычисленная плотность воздуха, усредненная за 10 мин	[кг/м^3]
$\sigma_{P, i}$	среднее квадратичное отклонение нормализованных данных по мощности в бине *i*	[Вт]
σ_{10min}	стандартное отклонение параметра, усредненное за 10 мин	
$\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	стандартное отклонение продольной/ поперечной/ вертикальной составляющей скорости ветра соответственно	
φ	относительная влажность воздуха (в диапазоне от 0 до 1)	
ω	угловая скорость	[1/с]

5 Подготовка к выполнению испытаний

Характерные условия испытаний, возникающие в период проведения измерений характеристик мощности ВЭУ, должны быть надлежащим образом определены и отражены в отчете по испытаниям в соответствии с разделом 9.

5.1 Ветроэлектрическая установка и ее подключение

В соответствии с разделом 6 ВЭУ и электрические подключения должны быть отражены в отчете, чтобы точно и однозначно установить отличительные особенности и модификацию испытуемой машины.

5.2 Испытательная площадка

На испытательной площадке поблизости от ВЭУ должна быть размещена метеорологическая мачта, которая служит для определения скорости набегающего воздушного потока, приводящего в действие ветро-

электрическую установку. Особенности испытательной площадки могут оказывать существенное влияние на измеряемые характеристики мощности ВЭУ. В частности, явления аэродинамического возмущения в набегающем потоке могут приводить к отличающимся, хотя и взаимосвязанным, значениям измеренных скоростей ветра на метеорологической мачте и на ветроэлектрической установке.

Аэродинамические препятствия должны быть оценены в отношении их влияния на испытательную площадку для того, чтобы:

- правильно выбрать расположение метеорологической мачты;
- определить подходящий сектор измерений;
- установить соответствующие поправочные аэродинамические коэффициенты;
- рассчитать погрешность, обусловленную аэродинамическими возмущениями в набегающем воздушном потоке.

В частности, должны быть учтены следующие факторы:

- природные изменения рельефа местности;
- наличие других ветроэлектрических установок;
- наличие аэродинамических препятствий (зданий, деревьев и др.).

Описание испытательной площадки должно быть выполнено и отражено в отчете в соответствии с разделом 9.

5.2.1 Выбор места для размещения метеорологической мачты

Выбор положения метеорологической мачты на площадке должен быть выполнен тщательно. Мачта не должна располагаться слишком близко к ветроэлектрической установке, чтобы не вызвать изменения, искажения скорости набегающего на ветроколесо воздушного потока. Она также не должна располагаться слишком далеко от ВЭУ, поскольку это вызовет уменьшение соответствия измеренной скорости ветра генерируемой электрической мощности. Метеорологическая мачта должна располагаться от ветроэлектрической установки на расстоянии, в 2 — 4 раза превышающем диаметр ветроколеса D ветроэлектрической установки. Рекомендуется расстояние, в 2,5 раза превышающее диаметр ветроколеса. Для ВЭУ с вертикальной осью ветроколеса должен быть определен эквивалентный диаметр D, $2 \cdot \sqrt{A/\pi}$, где A — площадь, ометаемая ветроколесом, расстояние определяется как $L + 0{,}5D$, где L — расстояние между метеорологической мачтой и осью башни эквивалентной ветроустановки с горизонтальной осью вращения.

До проведения испытаний по определению рабочих характеристик и для помощи при выборе местоположения метеорологической мачты следует определить и исключить из рассмотрения те секторы, в которых мачта и/или ветроэлектрическая установка могут находиться под воздействием возмущенного набегающего потока.

В большинстве случаев наилучшим местоположением метеорологической мачты во время испытаний является размещение мачты перед ВЭУ в направлении ожидаемого наиболее эффективного ветрового потока. Однако в других случаях более подходящим местом для мачты может оказаться установка ее сбоку от ветроустановки, например для ВЭУ, которая расположена на гребне возвышенности.

5.2.2 Сектор измерений

Секторы измерений должны исключать направления, на которых находятся значительные препятствия или другие ВЭУ как для испытываемой ветровой установки, так и для метеорологической мачты в соответствии с методом, приведенным ниже.

Все направления движения воздушного потока, в которых возникают аэродинамические следы от расположенных по соседству ветровых установок и прочих аэродинамических препятствий, должны быть исключены в соответствии с методикой, приведенной в приложении А.

Возмущенные секторы, исключаемые во время испытаний вследствие воздействия на метеорологическую мачту аэродинамического следа, созданного ветровой установкой, показаны на рисунке 1 для расстояний, в 2, 2,5 и 4 раза превосходящих диаметр ветроколеса ВЭУ. Причинами, в соответствии с которыми, эти секторы могут быть уменьшены, являются специфические топографические условия или неожиданные результаты измерений, полученные по направлениям, в которых находятся сложные препятствия. Все причины, в соответствии с которыми сектор измерений был уменьшен, необходимо строго документировать.

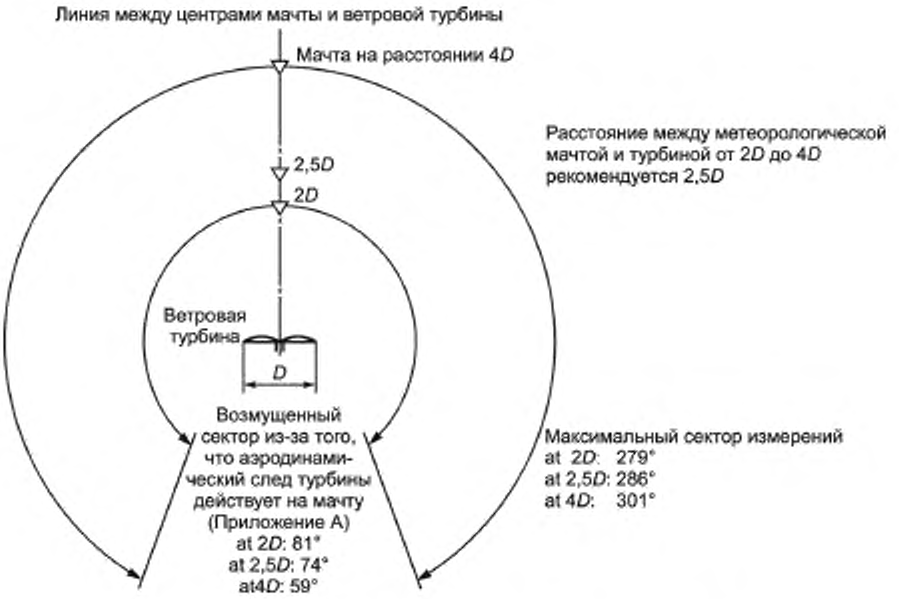


Рисунок 1 — Требования к расстоянию до метеорологической мачты и максимально допустимым секторам измерения

5.2.3 Поправочные коэффициенты и погрешности на топографическое искажение воздушного потока

Испытательная площадка должна быть рассмотрена на наличие топографических источников искажения воздушного потока. Оценка должна установить, можно ли провести измерение данных для графика выходной мощности без указанной калибровки площадки. Если критерии, установленные в приложении В выполнены, то режим ветрового потока на площадке не требует ее калибровки. Однако принимая необязательность поправочных коэффициентов на искажение воздушного потока, необходимо учесть погрешность, вызванную искажением воздушного потока на испытательной площадке. Минимальная погрешность от искажения воздушного потока метеорологической мачтой, расположенной на расстоянии, в 2 — 3 раза превышающем диаметр ветроколеса ВЭУ, должна составлять 2 % измеренной скорости ветра, и 3 % или более, если расстояние в 3 — 4 раза превышает диаметр ветроколеса, если не будут представлены объективные данные, позволяющие установить другую величину погрешности.

Если критерии приложения В не выполнены, или желательно уменьшить погрешность, обусловленную искажением течения воздушного потока на испытательной площадке, то необходимо провести экспериментальную калибровку испытательной площадки. При проведении экспериментальной калибровки испытательной площадки необходимо руководствоваться приложением С. Для каждого сектора должны быть использованы измеренные поправочные коэффициенты для течения воздушного потока.

6 Оборудование для испытаний

6.1 Измерение электрической мощности

Полезная электрическая мощность ВЭУ должна быть измерена с использованием приборов для измерения мощности (например, ваттметров) и основана на измерениях тока и напряжения на каждой фазе.

Класс используемых трансформаторов тока должен удовлетворять требованиям ГОСТ 7746, а класс трансформаторов напряжения — требованиям ГОСТ 1983. Класс используемых приборов должен быть не ниже класса 0,5. Если в качестве приборов для измерения мощности используются приборы и измерительные преобразователи в соответствии с ГОСТ 14014 и ГОСТ 24855, то их точность должна быть эквивалента точности датчика мощности класса 0,5.

Примечание — В международной практике точность прибора для измерения мощности назначается в соответствии с требованиями МЭК 60688 не ниже класса 0,5. Если в качестве прибора для измерения мощности используется не ваттметр, а другой прибор, то его точность должна быть эквивалентна точности класса 0,5.

Рабочий диапазон прибора для измерения мощности должен быть настроен таким образом, чтобы измерять все положительные и отрицательные мгновенные максимальные и минимальные значения мощности, вырабатываемые ВЭУ. Рекомендуется установить полномасштабный рабочий диапазон прибора для измерения мощности в интервале от — 50 % до + 200 % от номинальной мощности ВЭУ. Все данные, полученные в процессе испытаний, необходимо периодически проверять на соответствие установленному диапазону прибора для измерения мощности. Калибровка приборов должна быть проведена в соответствии с предписанными стандартами требованиями. Прибор для измерения мощности должен быть установлен между ВЭУ и точкой подключения к сети, чтобы гарантировать измерение только полезной активной электрической мощности (т. е. уменьшенной на величину собственных нужд). Необходимо указать, где во время испытаний был установлен прибор: на стороне ВЭУ или на стороне трансформатора к сети подключения.

6.2 Измерение скорости ветра

Измерения скорости ветра должны быть выполнены чашечным анемометром, удовлетворяющим требованиям приложения I. Для измерения характеристик мощности необходимо использовать анемометр с классом не ниже 1,7A. Кроме того, на территории, которая не удовлетворяет требованиям приложения B и требует выполнения калибровки площадки, рекомендуется использовать класс приборов выше чем 2,5B или 1,7S в соответствии с таблицей I.1.

Измеряемая скорость ветра определяется как средняя величина горизонтальной составляющей мгновенного вектора скорости ветра[1], включающая только продольную и боковую (поперечную) составляющие. При этом вертикальная, турбулентная составляющая исключается. Следовательно, угловая выходная характеристика чашечного анемометра должна быть в форме косинуса (см. приложение J). Все зафиксированные в отчете по испытаниям значения скорости ветра и все погрешности, влияющие на рабочие характеристики, должны соответствовать изложенному выше определению скорости ветра.

Чашечный анемометр необходимо калибровать перед проведением измерений и повторно после окончания измерений. Различие между линиями регрессии калибровки и повторной калибровки должно находиться в пределах ± 0,1 м/с в диапазоне скоростей ветра от 6 м/с до 12 м/с. При испытаниях рабочих характеристик калибровка проводится только перед проведением измерений. Калибровка чашечного анемометра должна быть выполнена в соответствии с методикой, изложенной в приложении F. При калибровке чашечный анемометр должен быть установлен на вертикальной подставке, форма которой повторяет форму конструкции, применяемой во время испытания характеристик мощности.

В качестве худшей альтернативы повторной калибровке допускается записать в отчете, что чашечный анемометр сохраняет свою калибровку в течение всего периода измерений. Необходимо использовать методику, изложенную в приложении K.

Чашечный анемометр должен быть установлен на метеорологической мачте на высоте, соответствующей высоте оси ветроколеса относительно земли с погрешностью ± 2,5 %. При установке чашечного анемометра должны быть выполнены требования, приведенные в приложении G.

Погрешность в измерении скорости ветра обусловлена тремя причинами (см. таблицу D.1): погрешностью калибровки прибора, погрешностью в рабочих характеристиках анемометра и искажением воздушного потока, вызванного установкой инструмента. Погрешность калибровки должна быть определена в соответствии с приложением F. Погрешность рабочих характеристик необходимо определять согласно приложению I в зависимости от классификации анемометра. Погрешность, возникающую вследствие неточности установки прибора, необходимо вычислять в соответствии с приложением G.

---

[1] Предполагается, что при использовании инструментов, которые способны измерять скорость ветра согласно такому определению, соответствующие кривые мощности будут получены в большинстве полевых условий. «Соответствующий» в данном контексте означает, что кривые мощности, измеряемые в наклонном течении, по существу такие же, как кривые мощности, измеряемые в условиях не наклонного течения. Особенную тщательность необходимо проявить для достижения правильной установки (выравнивания прибора), а также особенное внимание необходимо уделять осмотру анемометра для обнаружения неисправности чашечек. Неправильная установка или поврежденные чашечки могут существенно искажать результаты.

6.3 Измерение направления ветра

Направление ветра необходимо измерять с помощью флюгера. Флюгер в данном случае должен быть установлен на метеорологической мачте с вылетом в соответствии с приложением G. Суммарная погрешность измерений направления ветра, обусловленная калибровкой, работой и ориентацией прибора, не должна превышать 5°.

6.4 Измерение плотности воздуха

Плотность воздуха должна быть вычислена на основе измерений температуры воздуха и его давления в соответствии с уравнением (1). При высоких температурах рекомендуется также измерить относительную влажность и ввести поправки. Поправку на изменение плотности воздуха вследствие влияния его влажности необходимо определить на основе уравнения (F.1).

Для достоверного представления данных о температуре воздуха, соответствующей положению оси ветроколеса, при использовании датчиков температуры и влажности воздуха, указанные приборы должны быть установлены в пределах ± 10 м от уровня, соответствующего высоте оси ветроколеса.

Чтобы получить достоверные данные о величине давления воздуха в центре ветроколеса, датчик давления воздуха должен быть установлен на метеорологической мачте, на высоте, максимально близкой к положению оси ветроколеса. Если датчик давления установлен не на уровне высоты оси ветроколеса, то измеренные данные давления воздуха необходимо привести к высоте оси ветроколеса в соответствии с ГОСТ 4401.

6.5 Частота вращения и угол установки лопасти

Частота вращения и угол установки лопасти ветроколеса должны измеряться в процессе испытаний в случае особой необходимости, например, если надлежит сопоставить эти данные с данными акустических измерений. Если такие измерения проводятся, то их результаты необходимо отразить в документации в соответствии с разделом 9.

6.6 Состояние поверхности лопастей

Состояние поверхностей лопастей может влиять на величину выходной мощности, особенно для ВЭУ с регулируемым срывом потока. Для изучения характеристик ВЭУ рекомендуется отслеживать факторы, которые могут оказывать влияние на состояние поверхностей лопастей. К таким факторам относятся: выпадение атмосферных осадков, обледенение, налипание насекомых и грязи.

6.7 Система управления ветровой установкой

Чтобы обеспечить применение критерия выбраковки, изложенного в 7.4, необходимо записать, распознать и проверить достаточное количество сигналов о состоянии ВЭУ. Если ВЭУ имеет систему управления данными[1], то достаточно получить эти параметры из ее памяти. Определение каждого сигнала о состоянии ВЭУ должно быть отражено в отчете.

6.8 Система сбора данных

Для сбора результатов измерений и хранения предварительно обработанных данных необходимо использовать систему сбора цифровых данных со скоростью выборки не менее 1 Гц на канал.

Калибровка и точность цепочки системы сбора данных (передача, согласование сигналов и запись данных) должна быть проверена путем подачи тестовых сигналов на входы датчиков и сопоставления этих данных с записанными отсчетами. Следует руководствоваться тем, что погрешность системы сбора данных должна быть пренебрежимо малой по сравнению с погрешностями датчиков.

7 Методика измерений

7.1 Общие положения

Целью процедуры проведения измерений является сбор данных для точного определения характеристик выходной мощности ВЭУ. При сборе данных необходимо соблюдение ряда строго определенных условий, которые обеспечивают достаточное количество и качество измеренных данных. Процедура выполненных измерений должна быть отражена в отчете в соответствии с требованиями раздела 9 таким образом, чтобы каждый шаг методики и соответствующие условия испытаний могли быть пересмотрены и при необходимости воспроизведены.

[1] Для определения статуса сигнала о включении генератора достаточно проверить алгоритм контроля задержки отключения.

Точность измерений должна быть выражена в единицах погрешности измерений в соответствии с приложением D. В процессе выполнения измерений для обеспечения высокого качества и возможности воспроизведения результатов испытаний необходимо осуществлять периодический контроль получаемых данных. В журнале испытаний должны быть отражены все существенные события, происходившие в период измерения характеристик мощности.

7.2 Работа ветровой установки

ВЭУ в период проведения испытаний должна находиться в состоянии нормальной эксплуатации в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации, при этом ее настройки не должны изменяться. Рабочее состояние ВЭУ необходимо записывать на основе сигналов о ее состоянии в соответствии с разделом 9. В течение всего периода проведения измерений должно осуществляться предписанное руководством по эксплуатации техническое обслуживание ВЭУ. Выполненные работы должны быть зафиксированы в журнале испытаний.

Любые специальные работы по техническому обслуживанию ВЭУ, например частая промывка лопастей во время испытаний, обеспечивающая улучшенные рабочие характеристики, должны быть зафиксированы особо. Такое специальное техническое обслуживание не должно проводиться по умолчанию. Оно должно быть согласовано сторонами, участвующими в испытаниях, до начала испытаний.

7.3 Сбор данных

Сбор данных должен осуществляться непрерывно с частотой выборки не ниже 1 Гц. Данные о температуре, давлении воздуха, осадках, состоянии ВЭУ, если они фиксируются, могут быть выбраны с меньшей частотой, но не реже одного раза в минуту *(1/60 Гц)*.

Система сбора данных должна хранить как выбранные данные, так и статистические сведения о наборах данных в виде:

- среднего значения;
- среднего квадратичного отклонения;
- максимального значения;
- минимального значения.

Выбранные наборы данных должны основываться на 10-минутных периодах, получаемых из смежных измеренных данных. Данные должны собираться, пока выполняются требования 7.6.

7.4 Выбраковка данных

Чтобы обеспечить использование в анализе только тех данных, которые соответствуют нормальному рабочему режиму ВЭУ, а также для гарантии их достоверности, из базы должны быть исключены наборы данных, удовлетворяющие следующим условиям:

- величина скорости ветра находится за пределами рабочего диапазона ВЭУ;
- ВЭУ не работает из-за неисправного состояния;
- ВЭУ остановлена вручную, находится в тестовом режиме или в режиме обслуживания;
- ВЭУ находится в неисправном состоянии или имеется ухудшение рабочих характеристик (например, обледенение) измерительного оборудования;
- направление ветра вышло за пределы секторов измерения, которые определены в 5.2.2;
- направление ветра на площадке вышло за пределы эффективных (установленных) секторов, откалиброванных на эффективный ветер.

Любые другие критерии выбраковки данных должны быть строго обозначены в отчете.

График выходной мощности должен включать эффект задержки в алгоритме управления включением, а также эффект паразитных потерь ниже скорости включения. Влияние на график выходной мощности большой петли задержки в алгоритме управления отключением может оказаться существенным. В том случае, если в процессе выполнения измерений произошло выключение ВЭУ, то в базе данных должны быть представлены два набора данных. Один набор данных должен содержать все полученные измеренные данные (база данных А). Другой набор данных должен исключать все данные, которые приходятся на период прекращения выработки мощности из-за отключения ВЭУ при большой скорости ветра (база данных В)[1].

[1] Кривую мощности, построенную на базе данных А можно использовать для оценки воздействия на ВЭУ режима включения. Точно соответствуя данному месту и периоду испытаний, эта кривая мощности может отличаться для других периодов испытаний и для других площадок. Кривую мощности, построенную на базе данных В, которая не учитывает потери мощности из-за задержки отключения, можно использовать для сравнения и проверки кривых мощности в более общем случае.

Поднаборы из базы данных, собранные при особых условиях испытаний (например, большая шероховатость лопастей из-за наслоений пыли, соли, насекомых, наледи) или при особых атмосферных условиях (например, выпадение осадков, изменение скорости ветра по высоте), которые произошли в период измерений, рекомендуется выделить в особые базы данных.

Если порядок изменения частоты в сети составляет 2 Гц и более, то рекомендуется рассмотреть возможность формирования специальной базы данных для показателей мощности при различных уровнях частоты. В этом случае частоту сети необходимо распределить по частотным бинам, центрированным по целым значениям частоты сети.

7.5 Исправление данных

На основе результатов выполненной калибровки площадки для выделенных наборов данных скоростей ветра должны быть внесены поправки, учитывающие искажение воздушного потока (см. 5.2). Атмосферное давление необходимо корректировать, если измерения проводились не на высоте, близкой к высоте оси ветроколеса (см. 6.4).

7.6 База данных

После нормализации данных (8.1) выделенные наборы данных необходимо отсортировать, пользуясь «методом бинов» (8.2). Принятые в рассмотрение наборы данных должны охватывать, как минимум, диапазон скоростей, начиная от значения на 1,5 м/с ниже точки включения и кончая точкой со значением, в 1,5 раза превышающим скорость ветра при достижении 85 % номинальной мощности ветровой установки. С другой стороны, диапазон скоростей ветра должен простираться от значения на 1 м/с ниже точки включения до скорости ветра, при которой «измеренная *AEP*» больше или равна 95 % «экстраполированной *AEP*» (8.3). В отчете должно быть установлено, какой из двух вариантов был принят для задания диапазона измерения величин, используемых для построения графика выходной мощности. Диапазон скоростей ветра необходимо разделить на смежные бины по 0,5 м/с, центрированные по значениям, кратным 0,5 м/с.

Базу данных необходимо считать заполненной, если она удовлетворяет следующим критериям:

- каждый бин включает минимум 30 мин выборочных данных;
- база данных включает минимум 180 ч выборочных данных.

Если отдельный незаполненный бин может препятствовать завершению испытаний, тогда значение этого бина можно оценить на основе линейной интерполяции между двумя смежными полными бинами. Для завершения построения графика выходной мощности при высоких скоростях ветра можно воспользоваться следующей методикой:

- при скоростях ветра, более чем в 1,6 раза превышающих скорость ветра при 85 % номинальной мощности, сектор измерений можно оставить открытым.

На основе этих двух критериев должно выполняться следующее условие: AEP, измеренная с помощью расширенных методик, отличается меньше, чем на 1 % от AEP, полученной экстраполяцией до наивысшего заполненного бина скоростей ветра по расширенным методикам (по распределению Релея в соответствии с 8.3).

База данных должна быть представлена в отчете по испытаниям в соответствии с разделом 9.

8 Аналитические результаты

8.1 Нормализация данных

Отобранные наборы данных должны быть нормализованы по двум базовым плотностям воздуха. Одной из них является плотность воздуха на уровне моря (1,225 кг/м^3) для стандартной атмосферы в соответствии с ГОСТ 4401. Другая плотность воздуха является средней измеренной величиной плотностей воздуха, вычисленной на основе данных, полученных на площадке в периоды сбора достоверных данных, округленной до ближайшего значения с точностью 0,05 кг/м^3.

Нормализацию по фактической средней плотности воздуха выполнять не требуется, когда фактическая средняя плотность воздуха находится в пределах (1,225 ± 0,05) кг/м^3.

С другой стороны, может быть выполнена иная нормализация к номинальной, заранее установленной для площадки плотности воздуха.

Плотность воздуха может быть определена на основе измеренной температуры и давления воздуха согласно выражению

$$\rho_{10min} = \frac{B_{10min}}{R_0 \cdot T_{10min}}, \quad (1)$$

где ρ_{10min} — вычисляемая плотность воздуха, усредненная за 10 мин;
T_{10min} — измеренная абсолютная температура воздуха, усредненная за 10 мин;
B_{10min} — измеренное давление воздуха, усредненное за 10 мин;
R_0 — универсальная газовая постоянная для сухого воздуха, 287 Дж/(кг К).

Для ветровой установки с регулированием за счет срыва воздушного потока при постоянном угле установки лопасти и постоянной скорости вращения нормализация данных должна быть выполнена для измеренной генерируемой мощности по формуле

$$P_n = P_{10min} \frac{\rho_0}{\rho_{10min}}, \quad (2)$$

где P_n — нормализованная генерируемая мощность;
P_{10min} — измеренная мощность, усредненная за 10 мин;
ρ_0 — базовая плотность воздуха.

Для ветровой установки с активным управлением мощностью нормализация должна быть выполнена для скорости ветра в соответствии с выражением

$$V_n = V_{10min} \left(\frac{\rho_{10min}}{\rho_0} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где V_n — нормализованная скорость ветра;
V_{10min} — измеренная скорость ветра, усредненная за 10 мин.

8.2 Построение графика выходной мощности

Значения величин, необходимых для построения графика выходной мощности, должны быть вычислены для нормализованных наборов данных на основе «метода бинов» с использованием бинов по 0,5 м/с и вычислением средних значений нормализованной скорости ветра и нормализованной генерируемой мощности для каждого бина скоростей ветра по выражениям:

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j}, \quad (4)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j}, \quad (5)$$

где V_i — нормализованная и усредненная скорость ветра в бине i;
$V_{n,i,j}$ — нормализованная скорость ветра набора данных j в бине i;
P_i — нормализованная и усредненная генерируемая мощность в бине i;
$P_{n,i,j}$ — нормализованная генерируемая мощность по набору данных j в бине i;
N_i — число наборов данных по 10 мин в бине i.

График выходной мощности необходимо представить в соответствии с разделом 9. Если во время периода измерений достигнут режим выключения, необходимо представить два графика выходной мощности. График выходной мощности *A* должен быть построен на основе данных базы А, а при построении графика выходной мощности В должны быть использованы данные базы В, как описано в п. 7.4. Оба графика необходимо представить в соответствии с разделом 9.

8.3 Годовая выработка энергии (AEP)

Суммарная величина AEP рассчитывается на основе совместного рассмотрения графика выходной мощности и различных базовых частотных распределений скорости ветра. В качестве базового частотного распределения скорости ветра необходимо использовать распределение Релея, которое эквивалентно

распределению Вейбулла с коэффициентом формы 2. Оценки *AEP* должны проводиться для уровня высоты оси ветроколеса при значениях средних годовых скоростей ветра 4, 5, 6, 7, 8,9, 10 и 11 м/с по формуле

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^{N} \left[F(V_i) - F(V_{i-1})\right]\left(\frac{P_{i-1}+P_i}{2}\right), \quad (6)$$

где *AEP* — годовое производство энергии;

N_h — расчетное количество часов в году, равное 8760;

N — число бинов;

V_i — нормализованная и усредненная скорость ветра в бине i;

P_i — нормализованная и усредненная генерируемая мощность в бине i и по формуле

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{V}{V_{ave}}\right)^2\right), \quad (7)$$

где $F(V)$ — интегральная вероятностная функция распределения Релея для скорости ветра;

V_{ave} — годовая средняя скорость ветра на высоте оси ветроколеса;

V — скорость ветра.

Суммирование начинается присваиванием величине V_{i-1} значения $V_i - 0{,}5$ м/с, а величине P_{i-1} — значения 0,0 кВт.

В отдельных расчетных случаях могут быть известны номинальные условия, определяющие режимы ветра на рассматриваемой площадке. В этом случае может быть дополнительно рассчитано и представлено AEP на конкретной площадке, которое вычисляется на основе информации для данной конкретной площадки.

AEP рекомендуется вычислить двумя способами: один называется «измеренное значение AEP», а другой — «экстраполированное значение AEP». Если график выходной мощности не содержит данных до скорости ветра отключения, то график измеренной выходной мощности необходимо экстраполировать от максимальной полной измеренной скорости ветра до скорости ветра отключения.

Измеренное AEP должно быть получено на основе графика выходной мощности в предположении нулевой величины мощности для всех скоростей ветра выше и ниже диапазона измерений графика выходной мощности.

Экстраполированное AEP должно быть получено на основе измеренных значений графика выходной мощности в предположении нулевой мощности для скоростей ветра ниже самой низшей скорости ветра в графике измеренной выходной мощности и постоянной мощности для ветра со скоростью между самой высокой скоростью ветра в графике измеренной выходной мощности и скоростью ветра отключения. Эта постоянная мощность, используемая для экстраполяции AEP, должна быть равна значению мощности из бина при наивысшей скорости ветра в графике измеренной выходной мощности.

Измеренное значение AEP и экстраполированное значение AEP должны быть представлены в отчете по испытаниям в соответствии с разделом 9. При всех расчетах готовность ветровой установки должна быть принята равной 100 %. Для заданных средних годовых скоростей ветра оценки измеренной AEP необходимо обозначать как «неполные», если расчеты показывают, что измеренное AEP меньше 95 % экстраполированного AEP.

Оценки погрешности измерений в единицах стандартной погрешности для AEP согласно приложению D необходимо документировать для измеренного AEP при всех заданных средних годовых скоростях ветра.

Описанные выше погрешности в AEP относятся только к погрешностям, обусловленным самими испытаниями характеристик мощности, и не учитывают погрешности, обусловленные другими важными факторами, связанными с фактическим производством энергии данной установкой.

8.4 Коэффициент преобразования энергии

Коэффициент преобразования энергии C_P ветровой установки должен дополнять результаты испытаний и должен быть представлен в отчете в соответствии с разделом 9. Коэффициент C_P должен быть определен по графику выходной мощности в соответствии с формулой

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2}\rho_0 A V_i^3}, \quad (8)$$

где $C_{P,i}$ — коэффициент преобразования энергии в бине i;
V_i — нормализованная и усредненная скорость ветра в бине i;
P_i — нормализованная и усредненная генерируемая мощность в бине i;
A — площадь, ометаемая ветроколесом;
ρ_0 — базовая плотность воздуха.

9 Форма отчетности

Отчет по испытаниям должен содержать следующую информацию:

a) Маркировку и описание конфигурации конкретной ветровой установки, проходящей испытания в соответствии с 5.1, в том числе:

1) модель, тип, серийный номер, год изготовления;

2) диаметр ветроколеса и описание метода проверки его размера или ссылка на документацию, в которой установлена величина диаметра ветроколеса;

3) скорость ветроколеса или диапазон скоростей ветроколеса;

4) номинальную мощность и номинальную скорость ветра;

5) данные по лопастям: модель, тип, серийные номера, количество лопастей, фиксированный или переменный угол установки лопасти и угол (углы) установки лопастей;

6) высоту оси ветроколеса и тип башни;

7) описание системы управления (перечень устройств и версия программного обеспечения) и документация о сигналах состояния, используемых в преобразовании данных;

8) описание электрической схемы ВЭУ, т. е.: напряжение, частота и диапазон ее изменения, а также чертеж с обозначением места подключения приборов для измерения мощности, в частности, с внешней или внутренней стороны по отношению к трансформатору, и мощность собственных нужд.

b) Описание испытательной площадки в соответствии с 5.2, в том числе:

1) фотографии всех секторов измерения, предпочтительно сделанных с ветровой установки на высоте оси ветроколеса;

2) топографическую карту испытательной площадки и окружающей территории в радиусе не менее 20 диаметров ветроколеса ветровой установки с указанием расположения ветровой установки, метеорологической мачты, существенных аэродинамических препятствий, прочих ветровых установок и секторов измерений;

3) результаты оценки площадки, например, границы секторов достоверных измерений;

4) если была выполнена калибровка площадки, то должны быть указаны границы секторов измерения, окончательно установленных для проведения испытания, и приведены причины всех принятых отклонений от результатов оценки площадки.

c) Описание оборудования для испытаний в соответствии с 6:

1) описание датчиков и системы сбора данных, включая документацию по калибровке датчиков, каналов передачи данных и системы сбора данных;

2) описание размещения чашечных анемометров на метеорологической мачте, в соответствии с требованиями и описаниями в приложении G;

3) схема устройства метеорологической мачты с указанием основных, габаритных и присоединительных размеров и приспособлений для крепления измерительной аппаратуры;

4) описание метода калибровки анемометра в течение периода проведения испытаний и документация с результатами, подтверждающими выполнение калибровки.

d) Описание методики измерений в соответствии с разделом 7:

1) документация с указанием последовательности выполнения операций, условий испытаний, частоты выборки, периода усреднения, периода измерений;

2) журнал испытаний, содержащий все важные события при испытаниях характеристик мощности; в том числе содержащий перечисление всех операций по обслуживанию во время испытаний и перечисление всех особых действий (например, промывка лопастей), которые выполнялись для обеспечения улучшения эксплуатационных характеристик;

3) указание всех критериев выбраковки данных, которые не входят в список, приведенный в 7.4.

e) Представление измеренных данных в соответствии с 7.3 — 7.6:

Информация по каждому выбранному набору данных должна быть представлена как в табличном, так и в графическом форматах. Статистические данные измеренной генерируемой мощности должны быть представлены в функции скорости ветра и метеорологических факторов, оказывающих существенное влияние, в том числе:

- графики разбросов среднего значения, среднего квадратического отклонения, максимальной и минимальной генерируемой мощности в функции скорости ветра (графики должны содержать информацию по частоте выборки). Пример приведен на рисунке 2;
- графики разбросов средней скорости ветра и интенсивности турбулентности в функции направления ветра;
- графики разбросов интенсивности турбулентности в функции скорости ветра, а также необходимо указать среднюю интенсивность турбулентности в каждом бине скорости ветра;
- необходимо также привести особые базы данных, содержащие информацию, собранную при особых условиях эксплуатации и атмосферных явлениях, в соответствии с данными выше описаниями;
- в том случае, если проводятся измерения скорости вращения ветроколеса и угла установки лопасти, должны быть построены графики разбросов, включающие величины бинов по отношению к скорости ветра, и таблица с указанием величин бинов;
- определение сигналов состояния и графики сигналов состояния во время измерений.

f) Представление измерений графика выходной мощности для плотности воздуха на уровне моря в соответствии с 8.1 и 8.2:

1) график выходной мощности должен быть представлен в форме таблицы, аналогичной таблице 1.

Для каждого бина скорости ветра в таблице должны быть указаны:

- нормализованная и усредненная скорость ветра;
- нормализованная и усредненная генерируемая мощность;
- число наборов данных;
- расчетная величина C_P;
- стандартные погрешности категории A в соответствии с приложениями D и E;
- стандартные погрешности категории B в соответствии с приложениями D и E;
- суммарная стандартная погрешность в соответствии с приложениями D и E;

2) график выходной мощности должен быть представлен в графическом виде аналогично приведенному на рисунке 3. График должен представлять собой функцию от нормализованной и усредненной скорости ветра:

- нормализованную и усредненную генерируемую мощность;
- суммарную стандартную погрешность;

3) кривую C_P необходимо представить в графическом виде, аналогично изображенной на рисунке 4;

4) график и таблица должны быть привязаны к плотности воздуха на уровне моря 1,225 кг/м^3, используемой для нормализации;

5) если в период измерений была достигнута скорость ветра отключения, то график выходной мощности и кривую C_P или части этих кривых, отражающие влияние задержки отключения, необходимо представить в соответствии с требованиями 1), 2), 3) и 4).

g) Представление измерений графика выходной мощности для конкретной плотности воздуха на площадке в соответствии с 8.1 и 8.2.

Если средняя плотность воздуха на площадке отличается более чем на 0,05 кг/м^3 от 1,225 кг/м^3 или если требуется заранее определенная номинальная плотность воздуха, тогда необходимо выполнить второй вариант представления графика измеренной выходной мощности. Это представление должно быть таким же, как для плотности воздуха на уровне моря, но оно должно показывать график выходной мощности, полученный нормализацией конкретной плотности воздуха на площадке.

h) Представление измеренных значений графика выходной мощности, полученных при особых условиях эксплуатации и атмосферных явлениях, в соответствии с 7.5.

Графики выходной мощности, полученные на основе поднаборов базы данных при особых атмосферных явлениях и условиях эксплуатации, могут быть также представлены в отчете. В этом случае график выходной мощности должен быть представлен таким же образом, как для плотности воздуха на уровне моря, но с четким указанием на всех графиках и в таблицах особых условий эксплуатации и (или) атмосферных явлений.

i) Представление расчетной величины годовой выработки энергии для плотности воздуха на уровне моря в соответствии с 8.3:

1) таблица, которая для каждой средней годовой скорости ветра на высоте оси ветроколеса должна включать:

- измеренное значение AEP;
- стандартную погрешность измеренной величины AEP в соответствии с приложениями D и E;
- экстраполированное значение AEP;

2) в таблице также должна быть указана:

- базовая плотность воздуха;
- скорость ветра отключения ВЭУ;

3) если для какой-либо средней годовой скорости ветра измеренное значение AEP окажется меньше 95 % экстраполированного AEP, то таблица должна содержать отметку «неполное» в графе измеренных значений AEP;

4) если в период выполнения измерений была достигнута скорость ветра отключения, то необходимо дополнительно представить расчетное годовое производство энергии, включая явление задержки отключения аналогично 1) и 3); в таблице также следует указать базовую плотность воздуха.

j) Представление расчетного годового производства энергии для конкретной плотности воздуха на площадке в соответствии с 8.3:

Если средняя плотность воздуха на площадке отличается более чем на 0,05 кг/м^3 от 1,225 кг/м^3 или, если желательно использовать заранее определенную номинальную плотность воздуха, то необходимо представить вторую таблицу AEP. Это представление должно быть таким же, как и для плотности воздуха на уровне моря, но оно должно показывать результаты AEP, полученные нормализацией к конкретной плотности воздуха на площадке.

k) Представление измеренного коэффициента преобразования энергии в соответствии с 8.4.

Измеренный коэффициент преобразования энергии необходимо представить в функции скорости ветра в табличном и графическом виде с указанием площади, охватываемой ветроколесом.

l) Представление результатов калибровки площадки в соответствии с приложением C:

1) если была проведена калибровка площадки, то результаты должны быть представлены в отчете в графическом и табличном виде;

2) таблица для каждого бина направления скоростей ветра должна представлять.

- минимальные и максимальные граничные значения направления ветра;
- направление ветра, усредненное по бину;
- соотношение скоростей ветра, усредненное по бину;
- количество часов, в течение которых собраны данные;
- суммарную стандартную погрешность для соотношения скоростей ветра при 6, 10 и 14 м/с;

3) график в соответствии с рисунком 5 должен представлять:

- усредненное по бину соотношение скоростей ветра со средним квадратическим отклонением S_{a_j} в зависимости от направления ветра.

m) Погрешность измерений в соответствии с приложением D:

Должна быть представлена оценка погрешности для всех составляющих погрешности.

n) Отклонения от методики:

Любые отклонения от требований данного стандарта необходимо точно документировать в отдельной статье отчета. Каждое отклонение должно быть технически обосновано и приведена оценка его влияния на результаты испытаний.

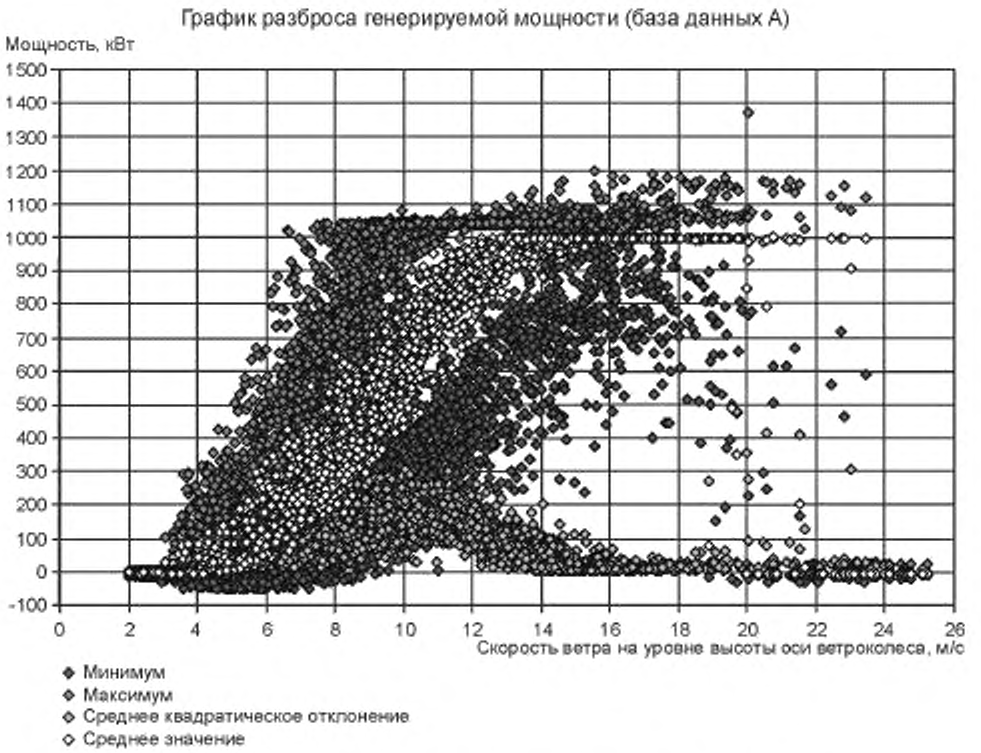




Рисунок 2 — Пример представления баз данных А и В: графики разбросов характеристик мощности в эксперименте, выборка которых проведена с частотой 1 Гц (средние значения получены усреднением за 10 мин)





Рисунок 3 — Пример представления графика измеренной выходной мощности для баз данных А и В





Рисунок 4 — Пример представления кривой C_P для баз данных A и B

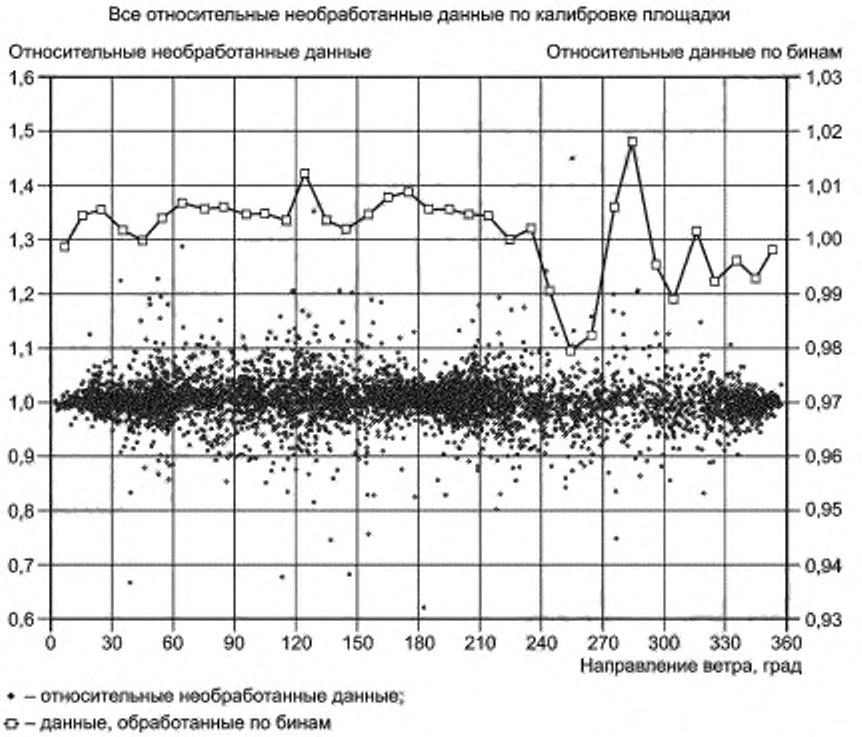


Рисунок 5 — Пример представления калибровки площадки (эффективные секторы только от 20° до 30°, от 40° до 60°, от 160° до 210° и от 330° до 350°)

Таблица 1 — Пример представления графика выходной мощности для базы данных А

График выходной мощности							
Опорная плотность воздуха, 1,225 кг/м^3				Номера наборов данных усредненных за 10 мин	Категория А	Категория В	Суммарная погрешность
Номер бина	Скорость ветра на высоте ступицы, м/с	Генерируемая мощность, кВт	C_P		Стандартная неопределенность S_i, кВт	Стандартная неопределенность U_i, кВт	Стандартная неопределенность $U_{c,i}$, кВт
4	2,1	–3,6	–0,26	138	0,05	6,3	6,3
5	2,5	–3,6	–0,16	275	0,04	6,3	6,3
6	3,0	–3,8	–0,10	270	0,13	6,3	6,3
7	3,5	–2,2	–0,03	320	0,56	6,3	6,3
8	4,0	–0,4	0,00	347	0,56	6,3	6,3
9	4,5	6,0	0,05	362	0,67	6,3	6,4
10	5,0	27,7	0,15	333	1,09	6,8	6,9
11	5,5	67,4	0,28	285	1,65	10,9	11,0
12	6,0	111,3	0,36	262	2,26	16,1	16,3
13	6,5	160,9	0,40	265	3,08	20,1	20,3
14	7,0	209,4	0,42	286	3,22	20,4	20,7
15	7,5	262,0	0,43	287	3,23	20,7	20,9

Окончание таблицы 1

График выходной мощности							
Опорная плотность воздуха: 1,225 кг/м^3				Номера наборов данных, усредненных за 10 мин	Категория А	Категория В	Суммарная погрешность
Номер бина	Скорость ветра на высоте ступицы м/с	Генерируемая мощность, кВт	C_P		Стандартная неопределенность S_i, кВт	Стандартная неопределенность U_i, кВт	Стандартная неопределенность $U_{c\ i}$, кВт
16	8,0	327,6	0,44	248	3,28	23,3	23,5
17	8,5	395,2	0,44	215	4,38	28,6	28,9
18	9,0	462,0	0,44	179	4,94	29,8	30,2
19	9,5	556,1	0,45	183	5,02	29,9	30,3
20	10,0	629,8	0,43	133	5,83	41,5	41,9
21	10,5	703,1	0,42	127	6,82	32,8	33,5
22	11,0	786,5	0,41	119	6,75	36,1	36,7
23	11,5	836,5	0,38	101	6,65	36,5	37,1
24	12,0	893,5	0,36	94	7,27	25,2	26,2
25	12,5	928,6	0,33	74	5,59	28,8	29,3
26	13,0	956,4	0,30	70	6,38	19,5	20,5
27	13,5	971,3	0,27	63	4,66	16,5	17,1
28	14,0	980,9	0,25	71	3,19	13,5	13,8
29	14,5	988,2	0,22	77	2,53	12,2	12,4
30	15,0	993,5	0,20	64	1,37	11,9	11,9
31	15,5	993,7	0,18	47	0,84	11,6	11,6
32	16,0	995,7	0,17	54	0,83	11,3	11,3
33	16,5	996,2	0,15	33	0,42	11,4	11,4
34	17,0	996,4	0,14	23	0,23	11,3	11,3
35	17,5	996,5	0,13	30	0,24	11,3	11,3
36	18,0	996,5	0,12	13	0,18	11,3	11,3
37	18,5	995,7	0,11	11	0,21	11,3	11,3
38	19,0	935,5	0,09	15	0,70	11,3	11,4
39	19,5	900,5	0,08	12	61,11	36,8	71,3
40	20,0	842,5	0,07	8	65,05	23,0	69,0
41	20,5	551,2	0,04	5	122,70	33,9	127,3
42	20,9	661,2	0,05	6	230,33	159,9	280,4
43	21,5	396,5	0,03	8	211,08	77,3	224,8
44	22,0	-6,3	0,00	6	176,06	144,4	227,7
45	22,6	494,3	0,03	4	0,03	224,5	224,5
49	24,6	–6,3	0,00	3	0,19	125,4	125,4
50	25,0	–6,3	0,00	3	0,04	6,3	6,3

Таблица 2 — Пример представления графика выходной мощности для базы данных B

График выходной мощности							
Опорная плотность воздуха: 1,225 кг/м^3				Номера наборов данных, усредненных за 10 мин	Категория A	Категория B	Суммарная погрешность
Номер бина	Скорость ветра на высоте ступицы м/с	Генерируемая мощность, кВт	C_P		Стандартная неопределенность S_i, кВт	Стандартная неопределенность U_i, кВт	Стандартная неопределенность $U_{c\,i}$, кВт
4	2,1	–3,6	–0,26	138	0,05	6,3	6,3
5	2,5	–3,6	–0,16	275	0,04	6,3	6,3
6	3,0	–3,8	–0,10	270	0,13	6,3	6,3
7	3,5	–2,2	–0,03	320	0,56	6,3	6,3
8	4,0	–0,4	0,00	347	0,56	6,3	6,3
9	4,5	6,0	0,05	362	0,67	6,3	6,4
10	5,0	27,7	0,15	333	1,09	6,8	6,9
11	5,5	67,4	0,28	285	1,65	10,9	11,0
12	6,0	111,3	0,36	262	2,26	16,1	16,3
13	6,5	160,9	0,40	265	3,08	20,1	20,3
14	7,0	209,4	0,42	286	3,22	20,4	20,7
15	7,5	262,0	0,43	287	3,23	20,7	20,9
16	8,0	327,6	0,44	248	3,28	23,3	23,5
17	8,5	395,2	0,44	215	4,38	28,6	28,9
18	9,0	462,0	0,44	179	4,94	29,8	30,2
19	9,5	556,1	0,45	183	5,02	29,9	30,3
20	10,0	629,8	0,43	133	5,83	41,5	41,9
21	10,5	703,1	0,42	127	6,82	32,8	33,5
22	11,0	786,5	0,41	119	6,75	36,1	36,7
23	11,5	836,5	0,38	101	6,65	36,5	37,1
24	12,0	893,5	0,36	94	7,27	25,2	26,2
25	12,5	928,6	0,33	74	5,59	28,8	29,3
26	13,0	956,4	0,30	70	6,38	19,5	20,5
27	13,5	971,3	0,27	63	4,66	16,5	17,1
28	14,0	980,9	0,25	71	3,19	13,5	13,8
29	14,5	988,2	0,22	77	2,53	12,2	12,4
30	15,0	993,5	0,20	64	1,37	11,9	11,9
31	15,5	993,7	0,18	47	0,84	11,6	11,6
32	16,0	995,7	0,17	54	0,83	11,3	11,3
33	16,5	996,2	0,15	33	0,42	11,4	11,4
34	17,0	996,4	0,14	23	0,23	11,3	11,3
35	17,5	996,5	0,13	30	0,24	11,3	11,3
36	18,0	996,5	0,12	13	0,18	11,3	11,3
37	18,5	995,7	0,11	11	0,21	11,3	11,3
38	19,0	996,6	0,10	14	0,59	11,3	11,3
39	19,4	996,1	0,09	10	0,21	11,3	11,3
40	20,0	994,1	0,09	5	0,41	11,3	11,3
41	20,5	987,4	0,08	2	2,67	11,4	11,7
42	20,9	996,9	0,08	3	3,38	11,8	12,3

Таблица 3 — Расчетная годовая выработка энергии (база данных А)

Средняя годовая скорость ветра на высоте ступицы (закон Релея), м/с	Измеренное АЕП (график измеренной мощности), МВт·ч	Стандартная погрешность в АЕП, МВт·ч	Стандартная погрешность в АЕП, %	Экстраполированное АЕП(график мощности), МВт·ч
4	481	99	21	481
5	1083	129	12	1083
6	1825	152	8	1825
7	2596	168	7	2596
8	3305	181	6	3305
9	3892	197	5	3892
10	4329	216	5	4329
11	4615	238	5	4615
Примечание — Базовая плотность воздуха: 1,225 кг/м^3. Отключающая скорость ветра: 25 м/с (экстраполяция постоянной мощностью по последнему бину).				

Таблица 4 — Расчетная годовая выработка энергии (база данных В)

Средняя годовая скорость ветра на высоте ступицы (закон Релея), м/с	Измеренное АЕП (график измеренной мощности), МВт·ч	Стандартная погрешность в АЕП, МВт·ч	Стандартная погрешность в АЕП, %	Экстраполированное АЕП (график мощности), МВт·ч	Примечание
4	481	99	21	495	
5	1083	129	12	1097	
6	1825	152	8	1841	
7	2597	165	6	2621	
8	3307	170	5	3362	
9	3890	169	5	4026	
10	4318	163	4	4590	Неполная
11	4591	156	4	5045	Неполная
Примечание — Базовая плотность воздуха: 1,225 кг/м^3. Отключающая скорость ветра: 25 м/с (экстраполяция постоянной мощностью по последнему бину).					

Примечание — Величины погрешностей в приведенных выше таблицах соответствуют коэффициенту охвата 1. Это означает, что доверительная вероятность (число повторений истинной величины годовой выработки энергии (АЕР) в интервалах повторяющихся замеров графика выходной мощности составляет от 58 % до 68 %. Это лишь оценка доверительной вероятности, так как точные данные по распределению вероятности измеряемой величины, как правило, отсутствуют. Верхнее значение (68 %) относится к нормальному распределению, нижнее (58 %) — к прямоугольному (равномерному) распределению.

Приложение А
(обязательное)

Оценка препятствий на площадке испытаний

А.1 Требования к проведению испытаний с учетом соседних и работающих ВЭУ

На проходящую испытания ВЭУ и метеорологическую мачту не должны оказывать влияние соседние установки. Если при проведении измерений мощности ВЭУ соседняя установка работала в течение какого-либо промежутка времени, то необходимо определить характеристики турбулентности аэродинамического следа данной соседней установки и учесть их в соответствии с требованиями данного приложения. Если же соседняя установка не работала во время измерений мощности испытуемой ВЭУ, то ее следует рассматривать как аэродинамическое препятствие и учесть ее влияние в соответствии с разделом А.2.

Расстояние от испытуемой установки и метеорологической мачты до соседней работающей ВЭУ должно быть не менее двух диаметров ветроколеса D_n соседней ВЭУ или двух диаметров ветроколеса испытуемой установки, если ее диаметр больше. Сектора, исключаемые из-за наличия возмущенного воздушного потока от соседней работающей ВЭУ, представлены на рисунке А.1. Расчеты должны быть выполнены на основании реального

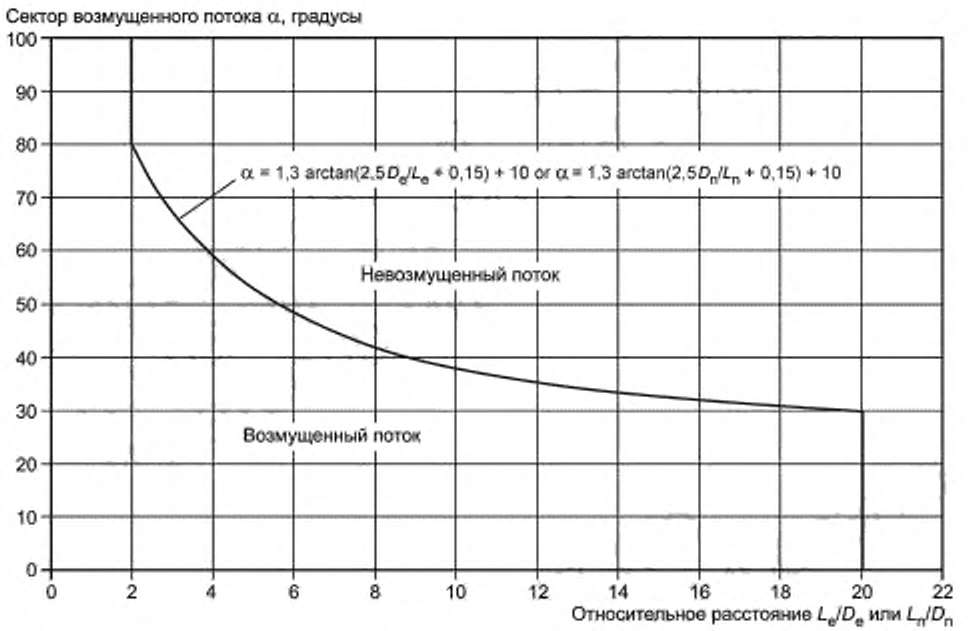


Рисунок А.1 — Секторы, которые необходимо исключить из-за возмущенного воздушного потока, вызванного соседней работающей ВЭУ и значительными аэродинамическими препятствиями

расстояния L_n и диаметра ветроколеса D_n соседней и работающей ВЭУ. Те секторы, которые должны быть исключены, следует определить как для испытуемой установки, так и для метеорологической мачты, их необходимо центрировать по направлению от соседней и работающей ВЭУ к метеорологической мачте или установке. Пример представлен на рисунке А.2.

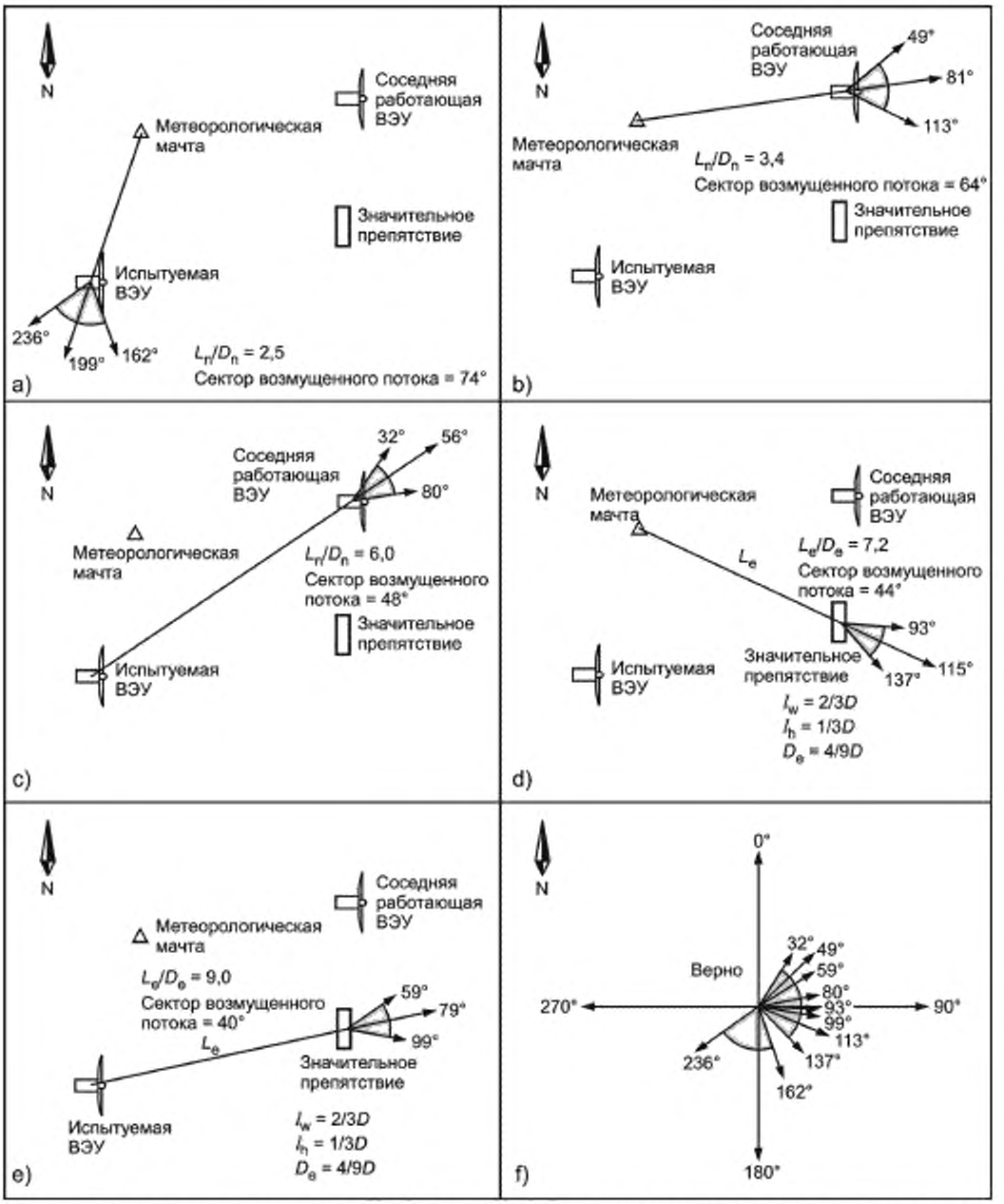


Рисунок А.2 — Пример секторов, которые необходимо исключить из-за воздействия турбулентного следа на испытуемую ВЭУ в результате влияния соседней работающей ВЭУ и значительного аэродинамического препятствия

На рисунке представлены секторы, которые необходимо исключить:
a) метеорологическая мачта находится в зоне аэродинамического следа испытуемой ВЭУ;
b) метеорологическая мачта находится в зоне аэродинамического следа соседней работающей ВЭУ;
c) испытуемая установка находится в зоне аэродинамического следа соседней работающей ВЭУ;

d) метеорологическая мачта находится в возмущенном воздушном потоке от значительного препятствия;

e) установка находится в возмущенном воздушном потоке от значительного препятствия;

a — e) — одновременно все случаи.

А.2 Требования к аэродинамическим препятствиям

В секторе измерения на принятом расстоянии между ВЭУ и метеорологической мачтой не должно быть значительных аэродинамических препятствий (например, зданий, деревьев, запаркованных ветровых установок). Допускается присутствие лишь небольших сооружений, обеспечивающих работу ВЭУ или измерительного оборудования.

Для оценки влияния препятствий на ВЭУ и метеорологическую мачту (на высоте оси ветроколеса) используют модель препятствия. Критерием отнесения препятствия к категории «крупное» является искажение потока ветра любого направления на 1% или более в секторе измерения между ВЭУ и метеорологической мачтой на высоте оси ветроколеса.

Влияние препятствия на метеорологическую мачту или ВЭУ на высоте ступицы z оценивают по следующим формулам:

$$\Delta U_z / U_h = -9{,}75(1-P_0)\frac{h}{x}\eta\exp(-0{,}67\eta^{1{,}5}); \quad (A.1)$$

$$\eta = \frac{H}{h}\left(K\frac{x}{h}\right)^{\frac{-1}{n+2}}; \quad (A.2)$$

$$K = \frac{2K^2}{\ln\frac{h}{z_0}}, \quad (A.3)$$

где x — расстояние по потоку от препятствия до метеорологической мачты или ВЭУ, м;

h — высота препятствия, м;

U_h — скорость невозмущенного воздушного потока на высоте h препятствия, м/с;

n — показатель степени в законе распределения скоростей ветра (n = 0,14);

P_0 — аэродинамическая проницаемость препятствия (0: твердое тело, 1: препятствие отсутствует);

H — высота оси ветроколеса, м;

z_0 — шероховатость поверхности, м;

K — константа фон Кармана, равная 0,4.

Секторы, содержащие значительные препятствия, должны быть исключены (рисунок А.1). Необходимо учитывать реальное расстояние L_e и эквивалентный диаметр D_e препятствия. Эквивалентный диаметр препятствия определяется по формуле

$$D_e = \frac{2l_h l_w}{l_h + l_w}, \quad (A.4)$$

где D_e — эквивалентный диаметр;

l_h — высота препятствия;

l_w — ширина препятствия.

Приложение В
(обязательное)

Оценка местности на площадке испытаний

Чтобы проводить испытания без калибровки площадки, местность на испытательной площадке должна иметь лишь незначительные отклонения от плоскости, проходящей через основание мачты ВЭУ и территорию в зоне указанных секторов.

Если местность отвечает указанным в таблице В.1 требованиям, то калибровку площадки проводить не требуется.

Если показатели, характеризующие рельеф местности, находятся в пределах дополнительных 50 % от границ максимальных уклонов, представленных в таблице В.1, то можно воспользоваться моделью потока, чтобы определить, можно ли пренебречь калибровкой площадки. Необходимо проверить, соответствует ли модель потока типу местности. Если модель потока дает разницу скоростей ветра в точке расположения анемометра и на высоте ветроколеса менее 1 % при скорости ветра 10 м/с в секторах измерения, то калибровка площадки не требуется. В противном случае необходимо провести калибровку площадки (рисунок В.1).

Таблица В.1 — Требования к площадке испытаний: перепады рельефа

Расстояние	Сектор	Наибольший уклон, %	Наибольшее отклонение рельефа от плоскости
$<2L$	360^0	< 3*	< 0,04 ($H + D$)
$\geq 2L$ и $< 4L$	Сектор измерения	< 5*	< 0,08 ($H + D$)
$\geq 2L$ и $< 4L$	За пределами сектора измерения	< 10**	Не применяется
$\geq 4L$ и $< 8L$	Сектор измерения	< 10*	< 0,13 ($H + D$)

* Наибольший уклон плоскости, которая наилучшим образом прилегает к рельефу местности в выбранных секторах измерений и проходит через основание мачты.

** Линия, имеющая самый большой уклон и соединяющая основание мачты с отдельными точками рельефа местности в пределах выбранного сектора.



Рисунок В.1 — Изображение местности, оценку которой нужно провести, вид сверху.

Приложение С
(обязательное)

Методика калибровки площадки

С.1 Общие положения

Калибровка площадки позволяет определить количественно влияние местности и препятствий на измерение величины вырабатываемой ВЭУ мощности и снизить их влияние. Рельеф местности и аэродинамические препятствия могут привести к систематической разнице между скоростями ветра в точках: на метеорологической мачте, где установлен анемометр, используемый для измерения мощности, вырабатываемой ВЭУ, и на оси ветроколеса.

Основным результатом калибровки площадки является таблица поправочных коэффициентов скорости воздушного потока для всех направлений ветра в заданном секторе измерения. Другим результатом является оценка погрешности этих поправочных коэффициентов. Калибровка может привести к появлению данных, доказывающих необходимость изменения допускаемого сектора измерения.

С.2 Подготовка к проведению калибровки

Перед монтажом или после демонтажа ВЭУ необходимо установить 2 метеорологические мачты. Одна метеорологическая мачта является базовой метеорологической мачтой и предназначена для измерения вырабатываемой ВЭУ мощности. Расположение второй мачты должно совпадать с положением ВЭУ. Для калибровки потребуются 2 анемометра, флюгер и система обработки и записи данных. Базовый анемометр и флюгер должны быть размещены на метеорологической мачте, используемой также для измерения вырабатываемой ВЭУ мощности. Другой анемометр, устанавливаемый в месте размещения ВЭУ, необходимо смонтировать на временной мачте максимально близко к месту будущего или бывшего расположения центра ветроколеса. Этот анемометр должен быть установлен на расстоянии от центра ветроколеса, не превышающем 2,5 % высоты оси ветроколеса; мачту необходимо установить максимально близко к оси симметрии ВЭУ, но не далее 0,2 *H* от оси симметрии ВЭУ, где *H* — высота оси ветроколеса. На временной мачте, располагающейся на месте установки ВЭУ, рекомендуется установить второй флюгер для получения дополнительной информации об искажении воздушного потока на испытательной площадке.

Используемые для калибровки площадки датчики должны отвечать требованиям раздела 6. Анемометры должны быть одного типа с одинаковыми рабочими характеристиками. Калибровку анемометров необходимо провести одновременно. Измерительные приборы метеорологической мачты должны быть такими же, какие используются для измерения вырабатываемой установкой мощности и калибровки площадки. В случае нарушения этого требования необходимо учесть дополнительную погрешность.

С.3 Сбор и анализ данных

Необходимо осуществлять непрерывный сбор данных с той же частотой выборки, что и при измерении вырабатываемой ВЭУ мощности. Данные смежных измерений необходимо сгруппировать по 10-минутным интервалам. Для каждого 10-минутного интервала необходимо вычислить и сохранить среднее значение, стандартное отклонение, минимальное и максимальное значения.

Сгруппированные массивы данных необходимо отсортировать по бинам направления ветра. Величина каждого бина не должна превышать 10°. Величина бина направления ветра должна быть не меньше погрешности датчика направления ветра.

Наборы данных необходимо изъять из базы данных в случае:

1) отказов или ухудшения рабочих характеристик (например, вследствие обледенения) измерительного оборудования;

2) выхода направления ветра за пределы сектора измерения в соответствии с 5.2.2;

3) если средняя скорость ветра менее 4 м/с или более 16 м/с;

4) воздействия каких-либо других особых атмосферных условий, принятых в качестве критических для измерения вырабатываемой ВЭУ мощности.

Массив данных для калибровки площадки должен состоять из наборов данных, собранных в течение периода времени, превышающего 24 ч для каждого неисключаемого бина направления ветра. В этих наборах каждый бин должен содержать данные о скорости ветра выше 8 м/с, собранные в течение периода времени,

превышающего 6 ч, и ниже 8 м/с, собранные также в течение периода времени, превышающего 6 ч. Помимо выполнения этих минимальных требований во время испытания необходимо следить за сходимостью данных[1].

На основе базы данных, собранной для калибровки площадки, необходимо найти для каждого сектора измерений средние значения поправочных коэффициентов α_j (отношение скорости ветра в месте расположения ветроколеса к скорости ветра на метеорологической мачте), учитывающих изменение воздушного потока рельефом местности.

С.4 Расчет погрешности

Погрешность измерения поправочных коэффициентов на изменение воздушного потока рельефом местности необходимо определять в соответствии с приложением D.

Пример расчета представлен в приложении Е, где для каждого бина направления ветра рассчитана суммарная погрешность.

С.5 Выбор окончательного сектора измерения

Очень часто для оценки площадки в соответствии с приложением А недостает данных для определения поправочных коэффициентов на искажение воздушного потока по какому-либо сектору измерения. Более того, поправочные коэффициенты в разных бинах направления ветра могут значительно отличаться. Рекомендуется исключить те направления ветра из секторов измерения, для которых разница между поправочными коэффициентами для воздушного потока в соседних секторах превышает 0,02.

В некоторых случаях калибровка площадки может показать, что препятствие не оказывает заметного влияния на определяемые поправочные коэффициенты, учитывающие искажение воздушного потока. В таких случаях можно расширить пределы сектора измерения, указанные в требованиях приложения А. При расширении сектора измерения необходимо учитывать вероятность появления турбулентного следа от препятствия, воздействующего на ветроколесо испытуемой ВЭУ, даже если он не оказывает влияния на анемометр, установленный на уровне оси ветроколеса.

С.6 Требования к отчетной документации

Требования к отчетной документации при калибровке площадки описаны в разделе 9.

С.7 Проверка результатов

Если была выполнена калибровка площадки, результаты калибровки, полученные на основе измерений с помощью двух мачт, можно проверить, используя данные измерений графика выходной мощности непосредственно при испытаниях ВЭУ. Для мощности, вырабатываемой ВЭУ ниже номинальной величины, скорость набегающего на ВЭУ воздушного потока можно получить по среднему значению выработанной энергии в данный момент времени на основе графика измеренной выходной мощности. Отношение скорости ветра, полученной по выработанной электрической энергии, к скорости ветра, измеренной на метеорологической мачте, следует усреднить по бинам направления ветра. В идеале эти коэффициенты скорости ветра должны быть идентичны поправочному коэффициенту для скорости ветра, полученному при калибровке площадки до монтажа ВЭУ.

---

[1] Наибольшую наглядность для этих целей дают графики нормализованных текущих средних значений в зависимости от количества часов в бине. Каждое текущее среднее значение нормализуется по конечному среднему значению, полученному на дату проведения анализа данных. Можно заметить, что для многих площадок текущие средние значения сходятся к конечному среднему значению с точностью 1 % при сборе данных в течение 8 — 16 ч. Дальнейшее снижение погрешности до 0,5 % можно получить, если продолжать сбор данных для бина в течение 24 ч или более. Если наблюдается один или более скачков текущих средних значений от нормализованного значения, нужно провести дальнейший анализ набора данных и убедиться, что с анемометрами и флюгером ничего не случилось.

Приложение D
(обязательное)

Оценка погрешности измерений

В данном приложении представлены требования к определению погрешности измерений.

Теоретические основы определения погрешности измерений методом бинов с примером оценки погрешности, приведенным в приложении Е.

Построение графика измеренной выходной мощности должно сопровождаться оценкой погрешности измерений. *Оценка погрешности должна быть выполнена в соответствии с требованиями данного стандарта.*

Примечание — В международной практике для определения погрешностей применяется «Руководство по выражению неопределенности измерений», 1995.

Существуют погрешности двух типов: категории А, величина которой может быть определена на основе измерений, и категории В, которые оценивают другими средствами. Для обеих категорий погрешности выражают через средние квадратические отклонения и называют стандартными погрешностями.

a) Измеряемые величины

Измеряемыми величинами являются значения графика выходной мощности, определенные на основе измеренных и нормализованных в бине значений мощности и скорости ветра в соответствии с 8.1 и 8.2, и выработанное за год количество электроэнергии в соответствии с 8.3. Погрешности измерений преобразуются в погрешность измеряемой величины с помощью коэффициентов чувствительности.

b) Составляющие погрешности

В таблице D.1 приведен минимальный перечень погрешностей параметров, которые необходимо включить в расчет погрешности.

Таблица D.1 — Перечень компонентов погрешности

Измеряемый параметр	Составляющая погрешности	Категория погрешности
Мощность	Трансформаторы тока	B
	Трансформаторы напряжения	B
	Датчик мощности или устройство измерения мощности	B
	Система сбора данных (см. примечание)	B
	Колебания электрической мощности	A
Скорость ветра	Калибровка анемометра	B
	Рабочие характеристики	B
	Влияние монтажа	B
	Система сбора данных (см. примечание)	B
	Искажение воздушного потока рельефом местности	B
Температура воздуха	Датчик температуры	B
	Защита от солнечных лучей	B
	Влияние монтажа	B
	Система сбора данных (см. примечание)	B
Давление воздуха	Датчик давления	B
	Влияние монтажа	B
	Система сбора данных (см. примечание)	B
Система сбора данных	Передача сигнала	B
	Точность системы	B
	Преобразование сигнала	B

Окончание таблицы D.1

Примечание — Метод данного стандарта основан на безусловном допущении, что средняя мощность, генерируемая ВЭУ за 10 мин, полностью определяется средней скоростью ветра и плотностью воздуха, измерение которых происходит одновременно в течение 10 мин на высоте оси ветроколеса.

Однако в действительности на величину генерируемой мощности оказывают влияние другие переменные характеристики воздушного потока, и поэтому идентичные ВЭУ вырабатывают различные мощности на различных площадках, даже в случае одинаковых скоростей ветра и плотностей воздуха на высоте оси ветроколеса на этих площадках. Другие переменные характеристики включают турбулентные составляющие скорости ветра (в трех направлениях); угол наклона вектора воздушного потока к горизонту, масштаб турбулентности и сдвиг средней скорости ветра по диаметру ветроколеса. В настоящее время аналитические методы способны оказать незначительную помощь в определении величины воздействия этих переменных характеристик, экспериментальные методики также имеют не менее серьезные трудности.

В результате график выходной мощности, полученный для различных площадок, будет отличаться. Поскольку переменные характеристики воздушного потока, влияющие на график выходной мощности, не измеряются и не учитываются, разброс в измерениях графика выходной мощности расценивается как погрешность.

Данная явная изменчивость величин рассмотренных объемов выработанной электроэнергии обусловлена различиями топографических и климатических условий: например при сравнении *AEP*, полученных в условиях гладкого рельефа местности, с *AEP*, измеренными на территории ветроэлектростанции, имеющей пересеченный рельеф.

Эту явную погрешность сложно выразить количественно. В зависимости от климатических условий и условий размещения погрешность может достигать нескольких процентов. В общем, можно ожидать, что величина погрешности будет возрастать с усложнением топографии и ростом частоты возникновения экстремальных атмосферных явлений.

Приложение Е
(справочное)

Теоретические основы определения погрешностей измерений методом бинов

Е.1 Общие положения

В самом общем виде суммарную стандартную погрешность мощности в бине i, $u_{c,i}$ можно выразить

$$u_{c,i}^2 = \sum_{k=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} c_{k,i}u_{k,i}c_{l,i}u_{l,i}\rho_{k,l,i,j}, \qquad (E.1)$$

где $c_{k,i}$ — коэффициент чувствительности k-го компонента в бине i;

$u_{k,i}$ — стандартная погрешность k-го компонента в бине i;

M — количество компонентов погрешности в каждом бине;

$\rho_{k,l,i,j}$ — коэффициент корреляции между k-м компонентом погрешности в бине i и l-м компонентом погрешности в бине j (в выражении оба компонента k и l находятся в бине i).

Компонент погрешности — отдельная входящая величина для определения погрешности каждого измеряемого параметра. Суммарную стандартную погрешность в расчетном годовом производстве энергии u_{AEP} в общем виде можно выразить формулой

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N} f_i c_{k,i}u_{k,i}f_j c_{l,j}u_{l,j}\rho_{k,l,i,j}, \qquad (E.2)$$

где f_i — условное событие появления скорости ветра в интервале скоростей ветра V_{i-1} и V_i: $F(V_i) - F(V_{i-1})$ в i-м бине;

$F(V)$ — интегральная функция распределения вероятности Релея для скорости ветра;

N — число бинов;

N_h — число часов в одном году = 8760.

В редких случаях удается в явном виде выразить все величины коэффициентов корреляции $\rho_{k,l,i,j}$, и обычно необходимо вводить значительные упрощения. Чтобы упростить выше приведенные выражения суммарной погрешности для практического использования, можно принять следующие допущения:

- компоненты погрешности либо полностью коррелированны (ρ = 1, и для нахождения суммарной стандартной погрешности применяют линейное суммирование); либо независимы (ρ = 0, и для нахождения суммарной стандартной погрешности применяют квадратичное суммирование, т.е. суммарная стандартная погрешность равна корню квадратному из суммы квадратов компонентов погрешности);

- все компоненты погрешности категории А взаимно независимы; компоненты погрешности категорий А и В независимы (они могут быть из одного бина или из разных бинов), в то время как компоненты погрешности категории В находятся в полной взаимной зависимости (например, погрешность датчика мощности в разных бинах).

На основе этих допущений суммарная погрешность мощности в бине — $u_{c,i}$ может быть представлена

$$u_{c,i}^2 = \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + \sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2 = s_i^2 + u_i^2, \qquad (E.3)$$

где M_A — число компонентов погрешности категории А;

M_B — число компонентов погрешности категории В;

$s_{k,i}$ — стандартная погрешность категории А k-го компонента в бине i;

u_i — суммарные погрешности категории А в бине i.

$u_{c,i}^2$ — зависит от размера бина вследствие зависимости $S_{P,i}$ от числа наборов данных в бине (равенство Е.10).

Применение допущений приводит к следующей суммарной стандартной погрешности в производстве энергии u_{AEP}

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^{N} f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \sum_{k=1}^{M_B}\left(\sum_{i=1}^{N} f_i c_{k,i}u_{k,i}\right)^2. \qquad (E.4)$$

Важность второго члена данного выражения заключается в том, что каждый отдельный компонент категории В относится к соответствующей погрешности *AEP*, что позволяет применить допущение о полной зависимости отдельных компонентов в бинах, и, наконец, перекрестные компоненты суммарной погрешности добавляются в виде квадратов к результирующей погрешности *AEP*.

На практике может оказаться неудобным суммировать компоненты погрешности категории В всех бинов до того, как они просуммированы по отдельности. Допущение, позволяющее суммировать компоненты погрешности категории В внутри бинов до суммирования компонентов по всем бинам (например, можно использовать s_i и u_i), дает более удобное выражение

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^{N} f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \left(\sum_{i=1}^{N} f_i \sqrt{\sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2} \right)^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^{N} f_i^2 s_i^2 + N_h^2 \left(\sum_{i=1}^{N} f_i u_i \right)^2 . \quad \text{(E.5)}$$

Величина u_{AEP}, полученная по этой формуле, всегда больше или равна полученной по формуле (Е.4).

Е.2 Расширенная погрешность

Суммарные стандартные погрешности графика выходной мощности и производимой за год энергии *AEP* дополнительно могут быть выражены через расширенные погрешности. Приняв допущение о нормальных распределениях, можно найти интервалы, имеющие доверительную вероятность, показанную в таблице Е.1, умножив эти суммарные стандартные погрешности на коэффициент охвата, также указанный в таблице Е.1.

Таблица Е.1 — Расширенные погрешности

Доверительная вероятность, %	Коэффициент охвата	Доверительная вероятность, %	Коэффициент охвата
68,27	1	95,45	2
90	1,645	99	2,576
95	1,960	99,73	3

Е.3 Пример

В приведенном ниже примере показана оценка погрешностей категорий А и В для каждого бина графика выходной мощности; определена погрешность графика выходной мощности, и, наконец, вычислена погрешность *AEP*.

Примечание — В примере использованы рекомендации, существующие в международной практике, а также принятые выше допущения.

Используя сумму компонентов погрешности категории В, найденную по выражению (Е.5), можно сначала сложить все компоненты погрешности в каждом бине, чтобы найти суммарную погрешность категории В для каждого измеряемого параметра, например для скорости ветра

$$u_{v,i}^2 = u_{V1,i}^2 + u_{v,2,i}^2 + \ldots, \quad \text{(E.6)}$$

где компоненты погрешности соответствуют компонентам погрешности в таблице Е.2 и имеют указанные в таблице символы и индексы. Затем стандартные погрешности измеряемых величин можно выразить через погрешности измеряемых параметров в бине i:

$$u_{C,i}^2 = s_{P,i}^2 + u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 + u_{B,i}^2 ; \quad \text{(E.7)}$$

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \left(\sum_{i=1}^{N} f_i^2 s_{P,i}^2 + s_w^2 + \left(\sum_{i=1}^{N} f_i \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{m,i}^2 u_{m,i}^2} \right)^2 \right), \quad \text{(E.8)}$$

где погрешности системы сбора данных являются частью погрешности каждого измеряемого параметра, а искажение потока, обусловленное влиянием местности, включено в погрешность скорости ветра. Погрешность, вызванную климатическими изменениями, s_w, определяют отдельно.

В примере рассматриваются лишь те компоненты погрешности, которые должны быть включены в расчет погрешности согласно таблице D.I. В примере использован график выходной мощности, показанный на рисунках 2 и 3 и в таблице 1. График выходной мощности экстраполирован постоянной мощностью, т.е. мощностью в последнем бине, предшествующем скорости ветра отключения ВЭУ 25 м/с. Результаты расчета погрешности также представлены на рисунке 3 и в таблицах 1 и 2. Все коэффициенты чувствительности сведены в таблицы Е.4 и Е.5, а погрешности категории В перечислены в таблицах Е.6 и Е.7.

Таблица Е.2 — Перечень погрешностей категории А и В

Категория В	Обозначение	Стандарт	Погрешность	Коэффициент чувствительности
Производство электроэнергии			$u_{P,i}$	$c_{P,i} = 1$
Трансформатор тока*	a	ГОСТ 7746	$u_{P1,i}$	
Трансформатор напряжения*	a	ГОСТ 1983	$u_{P2,i}$	
Датчик мощности * или	a	ГОСТ 24855	$u_{P3,i}$	
Устройство для измерения мощности*	c	ГОСТ14014	$u_{P4,i}$	
Скорость ветра			$u_{V,i}$	$c_{V,i} \approx \left\lvert \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}} \right\rvert$
Анемометр*	b		$u_{V1,i}$	
Эксплуатационные характеристики*	cd		$u_{V2,i}$	
Влияние монтажа*	c		$u_{V3,i}$	
Плотность воздуха				$c_{T,i} \approx \frac{P_i}{288{,}15\text{K}}$
Температура			$u_{T,i}$	
Датчик температуры*	a		$u_{T1,i}$	
Защита от солнечного излучения*			$u_{T2,i}$	
Влияние монтажа*	cd		$u_{T3,i}$	
Атмосферное давление	c		$u_{B,i}$	$c_{B,i} \approx \frac{P_i}{1013\text{hPa}}$
Датчик давления*	a	ГОСТ 4401	$u_{B1,i}$	
Влияние монтажа*	c		$u_{B2,i}$	
Система сбора данных			$u_{d,i}$	Коэффициент чувствительности получен по реальной погрешности параметра
Передача сигнала*	b		$u_{d1,i}$	
Точность системы *			$u_{d2,i}$	
Преобразование сигнала*	cd		$u_{d3,i}$	
Категория В: Рельеф				
Возмущение потока рельефом *	bc		$u_{V4,i}$	$u_{V,i}$ (см. выше)
Категория В: Метод				
Коррекция плотности воздуха	cd		$u_{m,i}$	$c_{T,i}$ и $c_{B,i}$
			$u_{m1,i}$	
Категория А: Статистическая				
Электрическая мощность*	e		$s_{P,i}$	$u_{P,i} = 1$
Изменения климатических характеристик	e		s_W	

* Параметр, необходимый для расчета погрешности.

Примечание — Классификация погрешностей:

a — ссылка на стандарт;

b — калибровка;

c — другой «объективный» метод»;

d — экспертная оценка;

e — статистика.

Таблица Е.3 — Погрешности калибровки площадки

Бин, номер, i	Скорость ветра, V_i, м/с	Калибровка площадки a, V_A, i	Бин, номер, i	Скорость ветра, V_i, м/с	Калибровка площадки a, V_A, i
4	2,0	0,1477	26	13,0	0,1498
5	2,5	0,1477	27	13,5	0,1499
6	3,0	0,1472	28	14,0	0,1500
7	3,5	0,1473	29	14,5	0,1501
8	4,0	0,1474	30	15,0	0,1503
9	4,5	0,1479	31	15,5	0,1503
10	5,0	0,1475	32	16,0	0,1507
11	5,5	0,1480	33	16,5	0,1513
12	6,0	0,1481	34	17,0	0,1512
13	6,5	0,1482	35	17,5	0,1523
14	7,0	0,1478	36	18,0	0,1530
15	7,5	0,1478	37	18,5	0,1530
16	8,0	0,1484	38	19,0	0,1522
17	8,5	0,1486	39	19,5	0,1521
18	9,0	0,1488	40	20,0	0,1539
19	9,5	0,1489	41	20,5	0,1541
20	10,0	0,1490	42	21,0	0,1505
21	10,5	0,1492	43	21,5	0,1512
22	11,0	0,1493	44	22,0	0,1548
23	11,5	0,1494	45	22,5	0,1530
24	12,0	0,1494	46	23,0	0,1557
25	12,5	0,1499	47	23,5	0,1567

Таблица Е.4 — Коэффициенты чувствительности (база данных А)

Бин номер, i	Кривая мощности (база данных А)		Коэффициенты чувствительности		
	Скорость ветра, V_i, м/с	Электрическая мощность, P_i, кВт	Скорость ветра, $c_{V,i}$, кВт/м/с	Температура воздуха, $c_{T,i}$, кВт/К	Давление воздуха, $c_{B,i}$, кВт/гПа
4	2,13	–3,64	1,71	0,01	0,00
5	2,49	–3,65	0,01	0,01	0,00
6	2,99	–3,78	0,27	0,01	0,0
7	3,51	–2,19	3,06	0,01	0,00
8	3,99	–0,43	3,65	0,00	0,00
9	4,50	6,04	12,83	0,02	0,01
10	4,98	27,70	44,69	0,10	0,03
11	5,52	67,39	74,00	0,23	0,07
12	5,98	111,30	94,47	0,39	0,11
13	6,51	160,95	95,05	0,56	0,16
14	7,01	209,42	95,41	0,73	0,21

Окончание таблицы Е.4

Бин, номер, i	Кривая мощности (база данных А)		Коэффициенты чувствительности		
	Скорость ветра, V_i, м/с	Электрическая мощность, P_i, кВт	Скорость ветра, $c_{V,i}$, кВт/м/с	Температура воздуха, $c_{T,i}$, кВт/К	Давление воздуха, $c_{B,i}$, кВт/гПа
15	7,50	261,96	107,51	0,91	0,26
16	8,00	327,63	132,16	1,14	0,32
17	8,50	395,23	136,16	1,37	0,39
18	8,99	462,01	134,67	1,60	0,46
19	9,49	556,06	187,71	1,93	0,55
20	10,00	629,80	144,25	2,19	0,62
21	10,47	703,06	157,30	2,44	0,69
22	11,00	786,55	156,23	2,73	0,78
23	11,50	836,48	101,15	2,90	0,83
24	11,99	893,52	116,32	3,10	0,88
25	12,49	928,61	69,27	3,22	0,92
26	13,03	956,44	51,66	3,32	0,94
27	13,50	971,30	31,58	3,37	0,96
28	14,00	980,92	19,49	3,40	0,97
29	14,48	988,17	15,10	3,43	0,98
30	15,00	993,46	10,20	3,45	0,98
31	15,49	993,71	0,50	3,45	0,98
32	15,99	995,70	3,97	3,46	0,98
33	16,54	996,22	0,96	3,46	0,98
34	17,02	996,42	0,42	3,46	0,98
35	17,48	996,48	0,12	3,46	0,98
36	17,95	996,50	0,04	3,46	0,98
37	18,49	995,71	1,48	3,46	0,98
38	18,97	935,54	125,87	3,25	0,92
39	19,45	900,46	71,97	3,12	0,89
40	19,97	842,52	112,19	2,92	0,83
41	20,50	551,21	549,95	1,91	0,54
42	20,92	661,19	261,26	2,29	0,65
43	21,47	396,55	480,32	1,38	0,39
44	22,02	–6,30	738,89	0,02	0,01
45	22,60	494,34	861,43	1,72	0,49
46	23,00	231,88	656,95	0,80	0,23
47	23,56	193,49	67,81	0,67	0,19
48	24,02	–7,92	445,39	0,03	0,01
49	24,56	–6,34	2,89	0,02	0,01
50	25,03	–6,30	0,08	0,02	0,01

Таблица Е.5 — Коэффициенты чувствительности (база данных В)

Бин, номер, i	Кривая мощности (база данных В)		Коэффициенты чувствительности		
	Скорость ветра, V_i, м/с	Электрическая мощность, P_i, кВт	Скорость ветра, c_{V_i}, кВт / м/с	Температура воздуха, c_{T_i}, кВт/К	Давление воздуха, c_{B_i}, кВт/гПа
4	2,13	–3,64	1,712	0,013	0,004
5	2,49	–3,65	0,014	0,013	0,004
6	2,99	–3,78	0,269	0,013	0,004
7	3,51	–2,19	3,062	0,008	0,002
8	3,99	–0,43	3,645	0,001	0,000
9	4,50	6,04	12,825	0,021	0,006
10	4,98	27,70	44,664	0,096	0,027
11	5,52	67,39	74,049	0,234	0,067
12	5,98	111,30	94,430	0,386	0,110
13	6,51	160,95	95,019	0,558	0,159
14	7,01	209,42	95,472	0,727	0,207
15	7,50	261,96	107,566	0,909	0,259
16	8,00	327,63	131,992	1,137	0,323
17	8,50	395,23	136,290	1,372	0,390
18	8,99	462,01	134,677	1,603	0,456
19	9,49	556,06	187,824	1,930	0,549
20	10,00	629,80	145,079	2,186	0,622
21	10,47	703,06	155,957	2,440	0,694
22	11,00	786,55	157,358	2,729	0,776
23	11,50	836,48	100,000	2,903	0,826
24	11,99	893,52	116,327	3,101	0,882
25	12,49	928,61	70,200	3,223	0,917
26	13,03	956,44	51,481	3,319	0,944
27	13,50	971,30	31,702	3,371	0,959
28	14,00	980,92	19,200	3,404	0,968
29	14,48	988,17	15,208	3,429	0,976
30	15,00	993,46	10,192	3,448	0,981
31	15,49	993,71	0,408	3,449	0,981
32	15,99	995,70	4,000	3,455	0,983
33	16,54	996,22	0,909	3,457	0,983
34	17,02	996,42	0,417	3,458	0,984
35	17,48	996,48	0,217	3,458	0,984
36	17,95	996,50	0,000	3,458	0,984
37	18,49	995,71	0,556	3,457	0,983
38	18,97	996,60	0,833	3,459	0,984
39	19,42	996,10	1,111	3,457	0,983
40	19,96	994,10	3,704	3,450	0,981
41	20,51	987,4	12,182	3,427	0,975
42	20,88	996,9	25,676	3,460	0,984

Таблица Е.6 — Погрешности категории В (база данных А)

Бин, номер i	Электрическая мощность, $u_{P,i}$, кВт	Скорость ветра, $u_{V,i}$, м/с	Скорость ветра, $c_{V,i}$, $u_{V,i}$, кВт	Температура воздуха $u_{T,i}$, К	Температура воздуха, $c_{T,i}$, $u_{T,i}$, кВт	Давление воздуха, $u_{B,i}$, гПа	Давление воздуха, $c_{B,i}$, $u_{B,i}$, кВт
4	6,29	0,19	0,33	2,09	0,03	3,18	0,01
5	6,29	0,19	0,00	2,09	0,03	3,18	0,01
6	6,29	0,19	0,05	2,09	0,03	3,18	0,01
7	6,29	0,19	0,60	2,09	0,02	3,18	0,01
8	6,29	0,20	0,71	2,09	0,00	3,18	0,00
9	6,29	0,20	2,53	2,09	0,04	3,18	0,02
10	6,29	0,20	8,86	2,09	0,20	3,18	0,09
11	6,30	0,20	14,81	2,09	0,49	3,18	0,21
12	6,32	0,20	19,05	2,09	0,81	3,18	0,35
13	6,35	0,20	19,35	2,09	1,17	3,18	0,51
14	6,39	0,21	19,57	2,09	1,52	3,18	0,66
15	6,44	0,21	22,27	2,09	1,90	3,18	0,82
16	6,52	0,21	27,70	2,09	2,37	3,18	1,03
17	6,62	0,21	28,85	2,09	2,86	3,18	1,24
18	6,74	0,21	28,86	2,09	3,35	3,18	1,45
19	6,93	0,22	40,68	2,09	4,03	3,18	1,75
20	7,09	0,22	31,64	2,09	4,57	3,18	1,98
21	7,28	0,22	34,91	2,09	5,10	3,18	2,21
22	7,51	0,22	35,13	2,09	5,70	3,18	2,47
23	7,65	0,23	23,03	2,09	6,06	3,18	2,63
24	7,82	0,23	26,81	2,09	6,48	3,18	2,81
25	7,93	0,23	16,19	2,09	6,73	3,18	2,92
26	8,02	0,24	12,24	2,09	6,93	3,18	3,00
27	8,07	0,24	7,58	2,09	7,04	3,18	3,05
28	8,10	0,24	4,74	2,09	7,11	3,18	3,08
29	8,13	0,25	3,72	2,09	7,16	3,18	3,10
30	8,14	0,25	2,55	2,09	7,20	3,18	3,12
31	8,14	0,25	0,13	2,09	7,20	3,18	3,12
32	8,15	0,26	1,02	2,09	7,22	3,18	3,13
33	8,15	0,26	0,25	2,09	7,22	3,18	3,13
34	8,15	0,26	0,11	2,09	7,22	3,18	3,13
35	8,15	0,27	0,03	2,09	7,22	3,18	3,13
36	8,15	0,27	0,01	2,09	7,22	3,18	3,13
37	8,15	0,28	0,41	2,09	7,22	3,18	3,13
38	7,96	0,28	35,16	2,09	6,78	3,18	2,94

Окончание таблицы Е.6

Бин, номер, j	Электрическая мощность, $u_{P,j}$, кВт	Скорость ветра, $u_{V,j}$, м/с	Скорость ветра, $c_{V,j}$, $u_{V,j}$, кВт	Температура воздуха $u_{T,j}$, К	Температура воздуха, $c_{T,j}$, $u_{T,j}$, кВт	Давление воздуха, $u_{B,j}$, гПа	Давление воздуха, $c_{B,j}$, $u_{B,j}$, кВт
39	7,84	0,28	20,44	2,09	6,53	3,18	2,83
40	7,67	0,29	32,32	2,09	6,11	3,18	2,65
41	6,91	0,29	159,68	2,09	4,00	3,18	1,73
42	7,17	0,29	76,82	2,09	4,79	3,18	2,08
43	6,62	0,30	144,22	2,09	2,87	3,18	1,25
44	6,29	0,30	224,40	2,09	0,05	3,18	0,02
45	6,80	0,31	265,85	2,09	3,58	3,18	1,55
46	6,41	0,31	205,65	2,09	1,68	3,18	0,73
47	6,37	0,32	21,58	2,09	1,40	3,18	0,61
48	6,29	0,28	125,27	2,09	0,06	3,18	0,02
49	6,29	0,29	0,83	2,09	0,05	3,18	0,73
50	6,29	0,29	0,02	2,09	0,05	3,18	0,61

Таблица Е.7 — Погрешности категории В (база данных В)

Бин, номер, j	Электрическая мощность, $u_{P,j}$, кВт	Скорость ветра, $u_{V,j}$, м/с	Скорость ветра, $c_{V,j}$, $u_{V,j}$, кВт	Температура воздуха $u_{T,j}$, К	Температура воздуха, $c_{T,j}$, $u_{T,j}$, кВт	Давление воздуха, $u_{B,j}$, гПа	Давление воздуха, $c_{B,j}$, $u_{B,j}$, кВт
4	6,29	0,19	0,33	2,09	0,03	3,18	0,01
5	6,29	0,19	0,00	2,09	0,03	3,18	0,01
6	6,29	0,19	0,05	2,09	0,03	3,18	0,01
7	6,29	0,19	0,60	2,09	0,02	3,18	0,01
8	6,29	0,20	0,71	2,09	0,00	3,18	0,00
9	6,29	0,20	2,53	2,09	0,04	3,18	0,02
10	6,29	0,20	8,85	2,09	0,20	3,18	0,09
11	6,30	0,20	14,82	2,09	0,49	3,18	0,21
12	6,32	0,20	19,04	2,09	0,81	3,18	0,35
13	6,35	0,20	19,34	2,09	1,17	3,18	0,51
14	6,39	0,21	19,57	2,09	1,52	3,18	0,66
15	6,44	0,21	22,28	2,09	1,90	3,18	0,82
16	6,52	0,21	27,66	2,09	2,37	3,18	1,03
17	6,62	0,21	28,87	2,09	2,86	3,18	1,24
18	6,74	0,21	28,86	2,09	3,35	3,18	1,45
19	6,93	0,22	40,71	2,09	4,03	3,18	1,75
20	7,09	0,22	31,82	2,09	4,57	3,18	1,98
21	7,28	0,22	34,61	2,09	5,10	3,18	2,21
22	7,51	0,22	35,38	2,09	5,70	3,18	2,47
23	7,65	0,23	22,77	2,09	6,06	3,18	2,63

Окончание таблицы Е.7

Бин, номер i	Электрическая мощность, $u_{P,i}$, кВт	Скорость ветра, $u_{V,i}$, м/с	Скорость ветра, $c_{V,i}$, $u_{V,i}$, кВт	Температура воздуха, $u_{T,i}$, К	Температура воздуха, $c_{T,i}$, $u_{T,i}$, кВт	Давление воздуха, $u_{B,i}$, гПа	Давление воздуха, $c_{B,i}$, $u_{B,i}$, кВт
24	7,82	0,23	26,81	2,09	6,48	3,18	2,81
25	7,93	0,23	16,41	2,09	6,73	3,18	2,92
26	8,02	0,24	12,20	2,09	6,93	3,18	3,00
27	8,07	0,24	7,61	2,09	7,04	3,18	3,05
28	8,10	0,24	4,74	2,09	7,11	3,18	3,08
29	8,13	0,25	3,75	2,09	7,16	3,18	3,10
30	8,14	0,25	2,55	2,09	7,20	3,18	3,12
31	8,14	0,25	0,10	2,09	7,20	3,18	3,12
32	8,15	0,26	1,03	2,09	7,22	3,18	3,13
33	8,15	0,26	0,24	2,09	7,22	3,18	3,13
34	8,15	0,26	0,11	2,09	7,22	3,18	3,13
35	8,15	0,27	0,06	2,09	7,22	3,18	3,13
36	8,15	0,27	0,00	2,09	7,22	3,18	3,13
37	8,15	0,28	0,15	2,09	7,22	3,18	3,13
38	8,15	0,28	0,23	2,09	7,22	3,18	3,13
39	8,15	0,28	0,32	2,09	7,22	3,18	3,13
40	8,15	0,29	1,07	2,09	7,21	3,18	3,12
41	8,12	0,29	3,54	2,09	7,16	3,18	3,10
42	8,15	0,29	7,54	2,09	7,23	3,18	3,13

Е.4 Погрешности категории А

Единственная требующая рассмотрения погрешность категории А — это погрешность измеренных и нормализованных данных по электрической мощности в каждом бине.

Е.4.1 Погрешность категории А при определении электрической мощности

Среднее квадратическое отклонение в распределении нормализованных данных по мощности в каждом бине вычисляется по формуле

$$\sigma_{P,i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1}\sum_{j=1}^{N_i}\left(P_i - P_{n,i,j}\right)^2}\ , \qquad (E.9)$$

где $\sigma_{P,i}$ — среднее квадратическое отклонение нормализованных данных по мощности в бине i;

N_i — число наборов данных за 10-минутный период в бине i;

P_i — нормализованная и усредненная генерируемая мощность в бине i;

$P_{n,i,j}$ — нормализованная генерируемая мощность по набору данных j в бине i

Стандартная погрешность нормализованной и усредненной мощности в бине должна быть определена по формуле

$$s_i = s_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{\sqrt{N_i}}\ , \qquad (E.10)$$

где $s_{P,i}$ — стандартная погрешность мощности категории А в бине i;

$\sigma_{P,i}$ — среднее квадратическое отклонение нормализованных данных по мощности в бине i;

N_i — число наборов данных за 10-минутный период в бине i.

Е.4.2 Погрешности категории А изменений климатических характеристик

Испытания характеристик мощности можно провести в особых атмосферных условиях, оказывающих систематическое влияние на результаты испытаний, например достаточно устойчивые (значительный вертикальный

сдвиг и низкая турбулентность) или неустойчивые (малый сдвиг и высокая турбулентность) атмосферные расслоения или частые и/или большие изменения направления ветра.

Порядок величины этой климатической погрешности s_w можно проверить:

a) делением записанных данных на сегменты, размер которых обеспечивает небольшую (статистическую) погрешность по мощности;

b) оцениванием производства энергии за год для каждого полученного графика выходной мощности и

c) вычислением среднего квадратического отклонения оценок производства энергии за год.

Е.5 Погрешности категории В

Считается, что погрешности категории В связаны с измерительными приборами, системой сбора данных и рельефом местности, окружающим площадку, где проводятся измерения характеристик мощности. Если погрешности выражают в виде диапазона погрешностей или же они имеют явные неединичные коэффициенты охвата, необходимо определить стандартную погрешность, либо их необходимо соответствующим образом преобразовать в стандартные погрешности.

Примечание — Рекомендуется рассматривать погрешность, выраженную через предел неопределенностей ± U. Если допустимо прямоугольное распределение вероятности, стандартная погрешность равна

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{3}}. \qquad (Е.11)$$

Если допустимо треугольное распределение вероятности, то стандартная погрешность равна

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{6}}. \qquad (Е.12)$$

Е.5.1 Погрешности категории В системы сбора данных

Погрешности системы сбора данных могут возникнуть при передаче, преобразовании сигнала, преобразовании аналогового сигнала в цифровой, обработке данных. Для различных каналов измерения погрешности могут отличаться. Стандартную погрешность системы сбора данных для полного диапазона некоторого канала измерения $u_{d,i}$ можно определить по формуле

$$u_{d,i} = \sqrt{u_{d1,i}^2 + u_{d2,i}^2 + u_{d3,i}^2}, \qquad (Е.13)$$

где $u_{d1,i}$ — погрешность передачи и преобразования сигнала в бине i;

$u_{d2,i}$ — погрешность оцифровывания в бине i, например вследствие квантованной разрешающей способности;

$u_{d3,i}$ — погрешность других элементов единой системы сбора данных (программное обеспечение, система хранения) в бине.

В данном примере мы предположили, что система сбора данных имеет стандартную погрешность $u_{d,i}$, составляющую 0,1 % полного диапазона каждого канала измерения.

Е.5.2 Погрешности категории В при измерении электрической мощности

В погрешность датчика мощности вносят вклад составляющие погрешности от трансформаторов тока и напряжения и от преобразователя мощности. Погрешности этих элементов обычно определяют по их классу.

Стандартную погрешность электрической мощности для каждого бина $u_{P,i}$ определяют сложением стандартных погрешностей от датчика мощности, трансформатора тока и напряжения и системы сбора данных

$$u_{P,i} = \sqrt{u_{P1,i}^2 + u_{P2,i}^2 + u_{P3,i}^2}, \qquad (Е.14)$$

где $u_{P1,i}$ — погрешность трансформаторов тока в бине i;

$u_{P2,i}$ — погрешность трансформаторов напряжения в бине i;

$u_{P3,i}$ — погрешность датчика мощности в бине i;

$u_{P4,i}$ — погрешность системы сбора данных по каналу мощности в бине i.

В данном примере трансформаторы тока и напряжения, датчик мощности отнесены к классу 0,5.

Трансформаторы тока класса 0,5 (номинальные нагрузки трансформаторов тока рассчитаны на номинальную мощность 1 000 кВт, а не на 200 % номинальной мощности). Согласно *ГОСТ 7746* их предельная погрешность составляет ± 0,5 % величины силы тока при 100 %-ной нагрузке. Однако при нагрузке 20 % и 5 % предельные погрешности увеличиваются до ± 0,75 % и ± 1,5 % величины силы тока соответственно. При измерениях характеристик мощности ВЭУ основную долю энергии ВЭУ вырабатывает при пониженной нагрузке. Поэтому мы ожидаем, что предельные погрешности ± 0,75 % тока при 20%-ной нагрузке являются хорошим усреднением. Предполагается, что распределение погрешностей подчиняется прямоугольному (равномерному) закону. Допустим, что погрешности трех трансформаторов тока обусловлены внешними факторами, такими как температура воздуха, частота тока силовой сети и т. д. По этой причине сделано допущение, что они полностью зависимы (исключение из общих допущений), и они суммируются линейно. Поскольку каждый трансформатор тока вносит 1/3 ошибок в измерения мощности, то отсюда следует, что погрешность всех трансформаторов тока пропорциональна мощности

$$u_{P1,i} = \frac{0{,}75\,\%\,P_i\,[\text{кВт}]}{\sqrt{3}}\frac{1}{3}3 = 0{,}43\,\%\,P_i\,[\text{кВт}]. \qquad \text{(E.15)}$$

Согласно ГОСТ 1983 трансформаторы напряжения класса 0,5 имеют предельную погрешность ± 0,5 % от величины напряжения при всех нагрузках. Предполагаем прямоугольный закон распределения погрешности. Напряжение сети, как правило, не меняется и не зависит от мощности ВЭУ. Как и для трансформаторов тока допустим, что погрешности трех преобразователей напряжения обусловлены внешними факторами, такими как температура воздуха, частота тока сети и т. д. По этой причине сделано допущение, что они полностью зависимы (исключение из общих допущений), и они суммируются линейно. Поскольку каждый трансформатор напряжения дает 1/3 ошибок в измерения мощности, то погрешность всех трансформаторов напряжения находится в следующей зависимости от мощности

$$u_{P2,i} = \frac{0{,}5\,\%\,P_i\,[\text{кВт}]}{\sqrt{3}}\frac{1}{3}3 = 0{,}29\,\%\,P_i\,[\text{кВт}]. \qquad \text{(E.16)}$$

Если трансформаторы тока и напряжения работают за пределами рабочих нагрузок вторичных контуров, необходимо учесть дополнительные погрешности.

Примечание — В соответствии с международной практикой согласно IEC 60688 преобразователь мощности класса 0,5 номинальной мощности 2 000 кВт (200 % номинальной мощности ВЭУ, 1 000 кВт) имеет предельную погрешность 10 кВт.

Предполагается прямоугольный закон распределения погрешности. Таким образом, погрешность преобразователя мощности равна

$$u_{P3,i} = \frac{10\,[\text{кВт}]}{\sqrt{3}} = 5{,}8\ \text{кВт}. \qquad \text{(E.17)}$$

Учитывая, что диапазон изменения электрической мощности канала измерения равен 2 500 кВт, а погрешность системы сбора данных составляет 0,1 % этого диапазона, получаем стандартную погрешность датчика электрической мощности для каждого бина

$$u_{P,i} = \sqrt{(0{,}43\,\%\,P_i\,[\text{кВт}])^2 + (0{,}29\,\%\,P_i\,[\text{кВт}])^2 + (5{,}8\ \text{кВт})^2 + (0{,}1\,\%\,2500\ \text{кВт})^2} = \sqrt{(0{,}52\,\%\,P_i\,[\text{кВт}])^2 + (6{,}3\ \text{кВт})^2}. \qquad \text{(E.18)}$$

E.5.3 Погрешности категории B при измерении скорости ветра

Погрешность измерений скорости ветра составляют несколько компонентов погрешности. Самыми значительными обычно являются: искажение воздушного потока рельефом местности, погрешности рабочих характеристик чашечного анемометра, погрешности влияния монтажа на анемометр, погрешности калибровки анемометра. Если местность отвечает требованиям приложения B, то погрешность искажения потока рельефом местности полагают 2 % или 3 %, в зависимости от расстояния от метеорологической мачты до ВЭУ. Если же проводится калибровка экспериментальной площадки в соответствии с приложением C, то необходимо использовать стандартную погрешность, определяемую при калибровке площадки. Монтаж анемометра может оказывать значительное влияние на искажение воздушного потока в соответствии с приложением G, если анемометр крепят не на трубе в верхней точке мачты. При измерениях доминирующее влияние могут оказывать погрешность калибровки анемометра в соответствии с приложением F и погрешность рабочих характеристик в соответствии с приложением I.

Погрешность категории B от скорости ветра в бине i, $u_{V,i}$ можно выразить следующей формулой

$$u_{V,i} = \sqrt{u_{V1,i}^{\ 2} + u_{V2,i}^{\ 2} + u_{V3,i}^{\ 2} + u_{V4,i}^{\ 2} + + u_{dV\,i}^{\ 2}}, \qquad \text{(E.19)}$$

где $u_{V1,i}$ — погрешность калибровки анемометра в бине i;

$u_{V2,i}$ — погрешность, обусловленная рабочими характеристиками анемометра, в бине i;

$u_{V3,i}$ — погрешность, обусловленная искажением потока из-за влияния монтажа анемометра, в бине i;

$u_{V4,i}$ — погрешность, обусловленная искажением потока рельефом местности, в бине i;

$u_{dV,i}$ — погрешность системы сбора данных по скорости ветра в бине i.

Коэффициент чувствительности определяют по местному наклону графика выходной мощности

$$c_{V,i} = \left|\frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}}\right|. \qquad \text{(E.20)}$$

Стандартная погрешность калибровки анемометра принимается равной 0,1 м/с.

Погрешность, обусловленную рабочими характеристиками анемометра, определяют в зависимости от класса прибора в соответствии с приложением I. В данном случае приборы имеют класс 1,2A. В случае прямоугольного закона распределения погрешности этому классу соответствует стандартная погрешность 0,034 м/с + 0,0034V_i.

Стандартная погрешность из-за искажения потока вследствие монтажа оценивается на уровне 1 % от скорости ветра. С учетом канала измерения скорости ветра в диапазоне 30 м/с и погрешности системы сбора данных в размере 0,1 % от этого диапазона, стандартная погрешность сбора данных равна 0,03 м/с. В данном примере предполагается, что калибровка площадки не проводилась, а искажение потока рельефом местности принято равным 3 % от скорости ветра. Погрешность каждого бина скорости ветра

$$u_{V,i} = \sqrt{\begin{array}{l}(0{,}1\ \text{м/с})^2 + (0{,}034\ \text{м/с} + 0{,}0034\,V[\text{м/с}])^2 + \\ + (0{,}01 V_i[\text{м/с}])^2 - (0{,}03 V_i[\text{м/с}])^2 + (0{,}00130\ \text{м/с})^2 =\end{array}} \quad \text{(E.21)}$$

$$= \sqrt{(0{,}104\ \text{м/с})^2 + (0{,}032 V_i[\text{м/с}])^2 + (0{,}034\ \text{м/с} + 0{,}0034 V_i[\text{м/с}])^2}\ .$$

В том случае, если проводилась калибровка площадки, погрешность от калибровки площадки необходимо включить как погрешность от искажения потока рельефом местности $u_{V4,i}$ вместо фиксированного значения (2 % или 3 %). Погрешность категории А от поправочных коэффициентов на движение воздушного потока для каждого бина направления ветра определяется по распределению замеренных поправочных коэффициентов на течение (отношение скорости ветра на ВЭУ к скорости ветра на метеорологической мачте). Среднее квадратическое отклонение распределения в каждом бине равно $s_{\alpha,j}$, а погрешность категории А — это среднее квадратическое отклонение средних значений $s_{\alpha,j} / \sqrt{N_j}$, где N_j — число отношений скоростей ветра в бине j направления ветра. Погрешность калибровки такая же, как для измерений графика выходной мощности. Погрешности рабочих характеристик двух чашечных анемометров при калибровке площадки можно считать коррелированными, если используются чашечные анемометры одного типа, и поэтому ими можно пренебречь. Погрешность калибровки площадки (отношение скоростей ветра для каждого бина j направления ветра) можно найти по формуле

$$u_{\alpha,i,j} = \sqrt{2u_{V1,i}^2 / V_i^2 + 2u_{dV,i}^2 / V_i^2 + s_{\alpha,j}^2 / N_j}\ , \quad \text{(E.22)}$$

где $u_{\alpha,i,j}$ — погрешность калибровки площадки в бине скорости ветра i и бине направления ветра j;

$u_{V1,i}$ — погрешность калибровки анемометра в бине i;

$u_{dV,i}$ — погрешность системы сбора данных для скорости ветра в бине i.

$s_{\alpha,j}$ — среднее квадратическое отклонение отношений скоростей ветра в бине направления ветра j;

N_j — число отношений скоростей ветра в бине направления ветра j.

Погрешность калибровки площадки находится в зависимости от скорости ветра. Рекомендуется представить погрешность калибровки площадки для специфической скорости ветра, например для 10 м/с. В разделе 6 указано, что погрешность необходимо вычислить для трех скоростей ветра.

Когда погрешность калибровки площадки включают в погрешность скорости ветра, тогда погрешность калибровки площадки умножается на коэффициент чувствительности, который равен скорости ветра в каждом бине

$$u_{V4,i,j} = \sqrt{2u_{V1,i}^2 + 2u_{dV,i}^2 + s_{\alpha,j}^2 V_i^2 / N_i}\ . \quad \text{(E.23)}$$

Погрешность каждого бина скорости ветра в графике выходной мощности необходимо «взвешивать» по числу данных в этом бине скорости ветра для каждого бина направления ветра при калибровке площадки

$$u_{V4,i} = \frac{\sum_j u_{V4,i,j} N_{i,j}}{\sum_j N_{i,j}}\ , \quad \text{(E.24)}$$

где $N_{i,j}$ — число наборов данных графика выходной мощности для бина скорости ветра i и бина направления ветра j.

Е.5.4 Погрешности категории В при измерении плотности воздуха

Плотность воздуха определяют по измерениям температуры и давления воздуха. Измерения температуры воздуха могут включать следующие компоненты погрешностей:

- погрешность калибровки датчика температуры;

- погрешность, вызванную несовершенством термоизоляции датчика температуры от солнечных лучей (плохая защита повышает температуру датчика);

- погрешность из-за влияния монтажа (вертикальные вариации в профиле температуры воздуха в дневное время и до наступления ночи влияют на определение температуры, если датчик размещен не на высоте ступицы).

Стандартную погрешность при измерении температуры воздуха для каждого бина $u_{T,i}$ можно выразить следующим образом

$$u_{T,i} = \sqrt{u_{T1,i}^2 + u_{T2,i}^2 + u_{T3,i}^2 + u_{dT,i}^2}\ . \quad \text{(E.25)}$$

где $u_{T1,i}$ — погрешность калибровки датчика температуры в бине i;

$u_{T2,i}$ — погрешность, вызванная несовершенством защиты датчика температуры от воздействия солнечных лучей в бине i;

$u_{T3,i}$ — погрешность влияния монтажа на датчик температуры в бине i;

$u_{dT,i}$ — погрешности системы сбора данных для температуры воздуха в бине i.

Коэффициент чувствительности для измерений температуры воздуха на уровне моря рассчитывается по формуле

$$c_{T,i} = \frac{P_i}{288{,}15}\left[\text{кВт} / \text{K}\right]. \qquad \text{(E.26)}$$

В случае размещения датчика не на оси ветроколеса в первую очередь следует с помощью поправочного коэффициента пересчитать измеренные значения давления воздуха, чтобы получить давление воздуха на оси ветроколеса. Следует учесть погрешность поправки и включить погрешность калибровки датчика давления. Стандартная погрешность $u_{B,i}$ измеряемого давления воздуха для каждого бина

$$u_{B,i} = \sqrt{u_{B1,i}^2 + u_{B2,i}^2 + u_{dB,i}^2}\ , \qquad \text{(E.27)}$$

где $u_{B1,i}$ — погрешность калибровки датчика давления в бине i;

$u_{B2,i}$ — погрешность из-за влияния монтажа датчика давления в бине i;

$u_{dB,i}$ — погрешности системы сбора данных для давления воздуха в бине i.

Поправочный коэффициент чувствительности для измеряемого давления воздуха на уровне моря рассчитан по формуле

$$c_{B,i} = \frac{P_i}{1013}\left[\text{кВт} / \text{гПа}\right]. \qquad \text{(E.28)}$$

При высокой средней температуре воздуха относительная влажность может давать значительную погрешность. На уровне моря при температуре воздуха 20 °С плотность воздуха меняется на 1,2 % в диапазоне относительной влажности от 0 % до 100 %. При температурах 30 °С и 40 °С она меняется на 2,0 % и 4,0 %, соответственно. Поэтому рекомендуется измерять и корректировать относительную влажность при высоких температурах воздуха. В данном примере влияние относительной влажности не учитывается.

Стандартная погрешность датчика температуры принята равной 0,5 °С. Принято, что несовершенство термоизоляции датчика температуры дает стандартную погрешность 2 °С. Стандартная погрешность монтажа на датчик температуры зависит от расстояния, измеренного по вертикали, между точкой установки датчика и осью ветроколеса. Если указанное расстояние не превышает 10 м, то стандартная погрешность принимается равной 1/3 °С. Полагая, что погрешность канала измерения температуры в диапазоне 40 °С и погрешность системы сбора данных составляет 0,1 % от этого диапазона, получаем следующее выражение стандартной погрешности температуры воздуха в каждом бине

$$u_{T,i} = \sqrt{(0{,}5\,\text{K})^2 + (2{,}0\,\text{K})^2 + (0{,}3\,\text{K})^2 + (0{,}1\%\,40\,\text{K})^2} = 2{,}1\,\text{K} \qquad \text{(E.29)}$$

Стандартная погрешность датчика давления принята равной 3,0 гПа. Принято допущение, что давление откорректировано под высоту ступицы в соответствии с ГОСТ 4401 (которое для стандартной атмосферы (нормальных атмосферных условий) и расстояния 28 м между точкой установки датчика и осью ветроколеса, измеренного по вертикали, составляет 3,4 гПа). Погрешность размещения принята равной 10 % величины поправки и составляет 0,34 гПа.

Полагая, что канал измерения давления имеет диапазон 100 гПа и погрешность системы сбора данных составляет 0,1 % этого диапазона, получаем следующее выражение для стандартной погрешности давления воздуха

$$u_{B,i} = \sqrt{(3{,}0\ \text{гПа})^2 + (0{,}34\ \text{гПа})^2 + (0{,}1\%\ 100\ \text{гПа})^2} = 3{,}0\ \text{гПа}\ . \qquad \text{(E.30)}$$

Е.5.5 Суммарные погрешности категории В

Погрешности категории В в каждом бине суммируются следующим образом

$$u_i = \sqrt{u_{P1,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2} =$$

$$= \sqrt{\begin{array}{l} s_{P,i}^2\left(0{,}52\,\%\,P_i\left[\text{кВт}\right]\right)^2 + (6{,}3\,\text{кВт})^2 + \\ + c_{V,i}^2\left\{(0{,}104\ \text{м}/\text{с})^2 + \left(0{,}032\,V_i\left[\text{м}/\text{с}\right]\right)^2 + (0{,}034\ \text{м}/\text{с} + 0{,}0034\,V_i\left[\text{м}/\text{с}\right])^2\right\}. \\ + c_{T,i}^2\left\{(2{,}1\,\text{K})^2 + c_{B,i}^2\,(3{,}0\ \text{гПа})^2\right\} \end{array}} \qquad \text{(E.31)}$$

Е.5.6 Суммарная стандартная погрешность для построения графика выходной мощности

Суммарные стандартные погрешности каждого бина для графика выходной мощности находят, суммируя погрешности категории А со всеми погрешностями категории В.

$$u_{c,i} = \sqrt{s_i^2 + u_i^2} = \sqrt{s_{P1,i}^2 + u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2} =$$

$$= \sqrt{\begin{array}{c} s_{P,i}^2 + \left(0{,}52\,\%\, P_i\,[\text{кВт}]\right)^2 + (6{,}3\,\text{кВт})^2 + \\ + c_{V,i}^2 \left((0{,}104\ \text{м/с})^2 + \left(0{,}032\, V_i\,[\text{м/с}]\right)^2 + \left(0{,}034\,\text{м/с} + 0{,}0034\, V_i\,[\text{м/с}]\right)^2 \right) \\ + c_{T,i}^2 \left((2{,}1\,\text{K})^2 + c_{B,i}^2\,(3{,}0\ \text{гПа})^2 \right) \end{array}} \qquad \text{(E.32)}$$

Е.5.7 Суммарная стандартная погрешность для вычисления вырабатываемой мощности

Суммарную стандартную погрешность *AEP* находят, суммируя в бинах отдельно погрешности категории А и В

$$u_{AEP} = N_h \sqrt{\sum_{i=1}^{N} f_i^2\, s_i^2 + \left(\sum_{i=1}^{N} f_i\, u_i \right)^2} =$$

$$= N_h \sqrt{\begin{array}{l} \sum_{i=1}^{N} f_i^2\, s_{P,i}^2 + \left(\sum_{i=1}^{N} f_i \sqrt{\begin{array}{l} \left(0{,}52\,\%\, P_i\,[\text{кВт}]\right)^2 + (6{,}3\ \text{кВт})^2 + \\ + c_{V,i}^2 \left((0{,}104\ \text{м/с})^2 + \left(0{,}32\, V_i\,[\text{м/с}]\right)^2 \right) + \\ + c_{T,i}^2 \left((2{,}1\,\text{K})^2 + c_{B,i}^2\,(3{,}0\ \text{гПа})^2 \right) \end{array}} \right), \end{array}} \qquad \text{(E.33)}$$

где $f_i = ((F_{i+1} - F_i) + (F_i - F_{i-1})) / 2$ — средняя вероятность скорости ветра в бине *i*.

Приложение F
(обязательное)

Калибровка чашечного анемометра

F.1 Общие требования

Ниже приведены общие требования к калибровке анемометра:

- результаты выполненной калибровки всех датчиков и измерительной аппаратуры должны быть отражены в документах. Сертификаты и отчеты по калибровке должны содержать информацию в объеме, установленном данным стандартом. Все ссылочные стандарты, используемые при калибровке анемометра, необходимо указать в отчете по испытаниям;
- используемые трубки Пито необходимо тарировать под соответствующие диапазоны скорости ветра, результаты тарировки документировать;
- перед каждой процедурой калибровки необходимо проверять целостность экспериментальных настроек с помощью сравнительной калибровки по «эталонному анемометру» в соответствии с установленной практикой;
- необходимо провести оценку качества потока;
- необходимо проверить воспроизводимость калибровки;
- калибровку анемометра необходимо сопровождать точной оценкой погрешности калибровки

F.2 Требования к аэродинамической трубе

Аэродинамическая труба должна быть соответствующим образом оборудована и тщательно подготовлена для проведения точного тарирования анемометров.

Присутствие анемометра не должно оказывать значительного влияния на поле воздушного потока в аэродинамической трубе. При проведении измерений на анемометр в определенной степени оказывает влияние эффект запирания или стенки аэродинамической трубы. Коэффициент запирания, определяемый как отношение фронтальной площади поверхности анемометра (включая конструкции его крепления) к общей площади сечения трубы в зоне испытания, не должен превышать 0,1 для открытой рабочей части и 0,05 — для закрытой рабочей части.

Течение по поперечному сечению, охватываемому анемометром, должно быть равномерным. Равномерность обтекания потоком необходимо оценить до калибровки анемометра. Равномерность потока можно оценить с помощью датчиков скорости, например, трубок Пито, нагретых проволок, лазерного доплеровского измерителя скорости, и измерения профилей течения в продольном, поперечном и вертикальном направлениях. Неравномерность потока не должна превышать 0,2 %. Данную проверку аэродинамической трубы достаточно провести один раз; всякий раз после внесения изменений в аэродинамические характеристики трубы должна быть выполнена повторная проверка.

Чашечные анемометры очень чувствительны к горизонтальным отклонениям ветра. Различные горизонтальные отклонения воздушного потока могут наблюдаться в зависимости от степени загрязнения сеток и сглаживающих устройств. По этой причине рекомендуется с помощью двух идентичных трубок Пито выполнить проверку горизонтального отклонения воздушного потока. Они должны быть установлены строго в месте будущего расположения анемометра, при этом их головки должны охватывать приблизительно всю зону, в которой вращаются чашечки анемометра. По выполненному ряду измерений следует вычислить линейную регрессию между скоростными напорами, замеренными этими двумя трубками Пито. Разница должна быть меньше 0,2 %. Интенсивность турбулентности в осевом направлении в месте расположения анемометра не должна превышать 2 %.

Коэффициент калибровки аэродинамической трубы, устанавливающий связь между условиями в эталонном сечении и условиями в сечении, где располагается анемометр, должен быть определен с помощью трубок Пито.

Установка должна быть подвергнута тщательному освидетельствованию на воспроизводимость результатов калибровки анемометров. Установка должна иметь специально предназначенный для этих испытаний эталонный анемометр. Этот эталонный анемометр необходимо использовать только для сравнения эксплуатационных характеристик данной установки с другими установками для калибровки анемометров. Испытания на воспроизводимость результатов эталонного анемометра должны состоять не менее, чем из 5 тестов калибровки (при различных атмосферных условиях). Допустимая максимальная разница между результатами калибровки при скорости ветра 10 м/с не должна превышать 0,5 %. Данная процедура должна быть повторена после внесения любых изменений в модификацию оборудования или его повторной калибровки.

Комплексные циклические испытания установки должны подтвердить сопоставимость этих результатов с результатами для других калибровочных установок анемометров. Усредненные результаты калибровки эталонного анемометра на данной установке (которые определялись в описанных выше испытаниях на воспроизводимость) не должны отличаться от усредненных результатов калибровок, проведенных на других установках, более чем на 1 % в диапазоне скоростей воздушного потока от 4 м/с до 16 м/с.

F.3 Требования к измерительным приборам и калибровочной конфигурации

Специальное оборудование, предназначенное для преобразования внешних сигналов, например преобразователи частоты в напряжение и другое, должно быть откалибровано отдельно от анемометров. Это необходимо для исключения влияния преобразователей сигналов на получение и передачу данных при калибровке анемометров.

Разрешение системы сбора данных должно быть не менее 0,02 м/с. В случае использования аналогового измерителя напряжения следует уделить особое внимание правильному хранению сигнала в буфере с тем, чтобы избежать его усиления низкоимпедансным оборудованием сбора данных.

Чтобы минимизировать искажение сигнала во время калибровки, анемометр необходимо установить в верхней точке штанги. Штанга должна иметь такие же размеры, как штанга для установки анемометра при постоянной эксплуатации в полевых условиях. Устройства крепления могут оказывать значительное влияние на чувствительность прибора, особенно в случае большого значения отношения диаметра штанги к диаметру анемометра.

Необходимо удостовериться, что на анемометр не оказывает влияние присутствие любого другого эталонного оборудования для измерения скорости ветра. И наоборот, присутствие анемометра не должно влиять на воздушный поток в зоне размещения эталонных измерительных приборов. Если же наблюдается искажение потока, то необходимо трубку Пито переместить в другое место. Данное влияние можно выявить, если поочередно демонтировать и повторно устанавливать на своих местах сначала анемометр, а затем эталонный измерительный прибор (трубку Пито или эталонный анемометр), и выяснять, изменяются ли выходные показания оставленных приборов. Чтобы избавиться от погрешности, вызванной неконтролируемой скоростью сноса в аэродинамической трубе, рекомендуется несколько раз повторить описанную процедуру.

Трубки Пито должны быть размещены в испытуемом сечении перпендикулярно полю воздушного потока аэродинамической трубы с максимально возможной точностью. Максимально допустимое отклонение составляет 1°.

Анемометр должен быть установлен в испытуемом сечении перпендикулярно полю воздушного потока аэродинамической трубы с максимально возможной точностью. Максимально допустимое отклонение составляет 1°. Ряд исследований показал, что чувствительность чашечного анемометра к вертикальному углу атаки зависит от геометрии прибора, и, как правило, анемометры очень чувствительны к отклонению от вертикального расположения.

Во время калибровки должен быть обеспечен контроль выходного сигнала анемометра для гарантии отсутствия влияния интерференции или шума.

F.4 Процедура калибровки

Анемометр должен находиться в работе не менее 5 мин до начала процедуры калибровки, чтобы исключить нестабильность коэффициента механического трения в опорных подшипниках при большом перепаде температур. Калибровку следует проводить как при возрастании, так и при убывании скорости ветра в диапазоне от 4 м/с до 16 м/с с шагом 1м/с или меньше. Получение данных при возрастающей скорости воздушного потока и при убывающей позволяет определить наличие гистерезиса измерительного оборудования.

Примечание — Можно реализовать шаг измерения 1 м/с, допуская при этом скачки в 2 м/с, например, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 15, 13, 11, 9, 7, 5 м/с.

Частота выборки должна быть не менее 1 Гц, интервал выборки — не менее 30 с. Этот временной интервал необходимо увеличить при калибровке анемометров с низким разрешением. Важно обеспечить считывание показаний анемометра и эталонного прибора измерения скорости ветра в один и тот же интервал времени. До начала сбора данных для каждой установленной скорости воздушного потока необходимо предусмотреть период времени, в течение которого должны установиться условия стабильного обтекания. Обычно на это требуется 1 мин, но от установки к установке этот интервал меняется. Обтекание может считаться стабильным, если средние значения за два последовательных 30-секундных интервала отличаются друг от друга не более 0,05 м/с.

Плотность воздуха ρ необходимо вычислять по средним значениям температуры воздуха T, относительной влажности φ, и барометрического давления B в аэродинамической трубе, используя равенство (F.1) (стандартная погрешность менее 10^{-3} кг/м^3)

$$\rho = \frac{1}{T}\left(\frac{B}{R_0} - \varphi P_w\left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w}\right)\right), \qquad (F.1)$$

где B — барометрическое давление, Па;

T — абсолютная температура, К;

φ — относительная влажность (в диапазоне от 0 до 1);

R_0 — газовая постоянная для сухого воздуха [287,05 Дж/кгК];

R_w — газовая постоянная для водяного пара [461,5 Дж/кгК];

P_w — давление пара, Па.

$$P_w = 0{,}0000205 \exp(0{,}0631846\, T), \qquad (F.2)$$

где давление пара P_w зависит от средней температуры воздуха.

Средняя скорость потока в сечении размещения анемометра вычисляется на основе средней величины перепада давления Δp_{ref} в эталонном месте размещения по формуле

$$\overline{V} = k_b \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \sqrt{\frac{2k_c}{C_h} \frac{\Delta p_{ref\ i}}{\rho}}, \qquad (F.3)$$

где C_h — коэффициент насадки трубки Пито;

k_c — коэффициент калибровки аэродинамической трубы, определенный ранее;

k_b — поправочный коэффициент на запирание;

n — число выборок в заданном интервале.

Поправочный коэффициент на запирание для аэродинамических труб с закрытой рабочей частью необходимо вычислять по теореме Максвелла. Если коэффициент поправки на запирание не вычисляется, тогда необходимо использовать для вычисления погрешности в аэродинамических трубах коэффициент на запирание примерно равный 1/4 с закрытой рабочей частью и 1/16 — с открытой рабочей частью.

F.5 Анализ данных

По результатам данных, полученных при калибровке, необходимо выполнить линейный регрессионный анализ для оценки следующих параметров регрессии: смещение и уклон, коэффициент регрессии, стандартная погрешность уклона и пересечения, а также ковариация уклона и пересечения для скорости ветра. Значения скорости ветра должны быть пересчитаны на основе выходных данных анемометра. Хотя может казаться более логичным выполнение коррекции выходных показаний анемометра по скорости ветра, удобней сделать наоборот. В процессе калибровки показания анемометра, как правило, известны с большой степенью точности; измерения скорости ветра определены гораздо менее точно.

Если коэффициент корреляции данных r меньше 0,99995,то калибровку необходимо повторить. Если коэффициент по-прежнему недостаточно высок, тогда установка, на которой проводится калибровка, не подходит; или анемометр обладает избыточной нелинейностью и его нельзя использовать.

F.6 Анализ погрешности

Общеизвестно, что важным моментом расчетов является определение погрешности, с которой горизонтальная составляющая скорости воздушного потока действует на анемометр. Необходимо, чтобы расчет погрешности, выполняемый в соответствии с требованиями *настоящего стандарта*, приводил к выражению погрешности, включающей погрешности типа А и В. Величина суммарной погрешности должна быть определена методами математической статистики, при этом следует учесть:

- погрешность измерения скорости воздушного потока (трубки Пито, преобразователи, расчет плотности воздуха и т.д.);
- погрешность измерения частоты;
- погрешность калибровки аэродинамической трубы, включая эффект запирания;
- нестабильность воздушного потока вблизи анемометра.

F.7 Формат отчетной документации

Информация о методике и оборудовании, которые были использованы для калибровки анемометров, должна быть отражена в соответствующей документации: отчете по комплексным калибровочным испытаниям и отчете о калибровке анемометра для каждого анемометра.

Отчет по комплексным калибровочным испытаниям должен содержать, как минимум, следующую информацию:

- технические и конструктивные характеристики аэродинамической трубы;
- схему аэродинамической трубы с точным обозначением мест расположения анемометров и трубок Пито в рабочей части;
- данные измерений качества воздушного потока;
- поправочный коэффициент на запирание;
- сертификаты измерительных приборов;
- описание методики проведения измерений;
- методику расчета;
- документацию по повторным калибровкам анемометра;
- расчет погрешности;
- отклонения от этих требований.

Отчет о калибровке анемометра должен содержать, как минимум, следующую информацию:

- марку, тип и серийный номер тестируемого анемометра, серийный номер чашечек, если они доставляются отдельно;
- диаметр штанги в монтажном устройстве;
- марку, тип и серийный номер внешних преобразователей (если они используются, например, преобразователи частоты в напряжение);
- имя и адрес заказчика;
- подписи лиц, выполнивших калибровку, осуществивших проверку результатов и утвердивших отчет;
- название аэродинамической трубы;

- условия окружающей среды в процессе калибровки (температура, давление и влажность воздуха);
- параметры регрессии (смещение и уклон, коэффициент регрессии, стандартная погрешность уклона и пересечения, а также ковариация уклона и пересечения для скорости ветра);
- представление в виде таблиц и графиков (отклонения от уточненной линии линейной регрессии) всех точек калибровки и результатов регрессии;
- погрешность в каждой точке измерений;
- ссылку на отчет по комплексным калибровочным испытаниям, дату калибровки;
- фотографию анемометра и фотографию установленного в аэродинамической трубе анемометра.

F.8 Пример расчета погрешности

В идеальном случае необходимо провести независимые расчеты погрешностей для всех условий калибровки скорости воздушного потока, используемых в испытаниях по калибровке. Для данного примера была выбрана воображаемая точка калибровки при 10 м/с в аэродинамической трубе с номинальной скоростью течения 25 м/с.

Таблица F.1 — Пример оценки погрешности калибровки анемометра

Источник ошибки, u_i	Описание	Значение, u_i	Значение коэффициента чувствительности, c_i	$u_i c_i$, м/с
u_f, коэффициент поправки на аэродинамическую трубу, k_f	Сравнение современных аэродинамических труб показало, что необходимо использовать коэффициент поправки на скорость ветра 0,5 %, т. е. $k_f = 1{,}005$. Предлагается в качестве стандартной погрешности использовать половину разницы между откорректированным и неоткорректированным значениями	0,0025	$c_f = v/k_f = 10$ м/с/ / 1,005 = 9,95 м/с	0,025
u_c, коэффициент калибровки аэродинамической трубы, k_c	Калибровку аэродинамической трубы можно проводить с двумя трубками Пито, одну расположить в постоянном эталонном месте, другую — в месте расположения анемометра при испытаниях. Перестановкой этих двух трубок Пито можно исключить все ошибки типа В, а стандартный регрессионный анализ можно применить для получения поправочного коэффициента (отрезок прямой принудительно проводится через начало координат) и соответствующей стандартной погрешности типа А. Предположим, что коэффициент поправки равен 1,02, стандартная погрешность — 0,01	0,01	$c_c = 0{,}5\ v/k_c =$ $= 0{,}5\ 10/1{,}02 =$ $= 4{,}90$ м/с	0,049
$u_{p,t}$, чувствительность датчика давления, $k_{p,t}$	Предположим, что датчик давления рассчитан на 500 Н/м^2. При скорости ветра 10 м/с давление будет около 60 Н/м^2. Предполагая, что пределы на погрешность указаны производителем и равны 0,2 % всей шкалы (1 Н/м^2), и предполагая треугольное распределение погрешности, тогда эквивалентное среднее квадратическое отклонение можно определить как $1/\sqrt{6}$ или 0,40 Н/м^2. Предполагая также, что чувствительность датчика, $k_{p,t}$, равна 5000 Н/м^2 на 1 В (максимум 100 мВ на выходе), тогда стандартная погрешность при 60 Н/м^2 $u_{p,t}$ составляет 33 Н/м^2 на 1 В	33	$c_{p,t} = 0{,}5\ v/k_{p,t} =$ $= 0{,}5\ 10/5000 = 0{,}001$	0,033

Продолжение таблицы F.1

Источник ошибки, u_i	Описание	Значение, u_i	Значение коэффициента чувствительности, c_i	$u_i c_i$, м/с
$u_{p,s}$, коэффициент усиления датчика давления, $k_{p,s}$	Предположим, что усиление сигнала рассчитано на увеличение максимального выходного напряжения датчика (100 мВ) по всему диапазону шкалы системы данных (10 В), тогда требуемый коэффициент усиления равен 100, т. е., $k_{p,s}$ = 0,01. Предполагая, что стандартная погрешность равна 0,2 %, получаем значение $u_{p,s}$, равное 0,00002	0,00002	$c_{p,s} = 0,5\ v/k_{p,s} =$ $= 0,5\ 10/0,01 = 500$	0,010
$u_{p,d}$, преобразование выборки данных датчика давления, $k_{p,d}$	Разрешающая способность системы сбора данных определяется значениями всей шкалы, например, 12 бит (4096 значений) для 20 В или $k_{p,d}$ — 0,00244 В. Пределы квантования равны половине от этого, т. е. 0,00122 В, и поскольку справедливо прямоугольное распределение, соответствующая стандартная погрешность равна $0,00122/\sqrt{3}$ или 0,000704 В	0,000704	$c_{p,d} = 0,5\ v/k_{p,d} =$ $= 0,5\ 10/0,00244 =$ $= 2049$	0,004
$u_{T,t}$, датчик температуры среды, $k_{T,t}$	Температура может оказаться сложным параметром для обработки, так как там, где вышеупомянутая теория допускает нулевой сдвиг в зависимости, связывающей температуру с выходными показаниями датчика, в действительности существует очень большое смещение. Как правило, система измерения температуры может быть настроена на показания тока в диапазоне 4 мА — 20 мА для диапазона температуры от –20 °С до 30 °С. Вместо математических преобразований можно использовать другой прием. Допустим, что датчик верен для 0,2 °С. В предположении треугольного распределения это дает стандартную погрешность 0,08 °С. Известно, что это — погрешность датчика, а не всей температурной цепи. Возвращаясь вновь к основному уравнению для скорости ветра в физических параметрах T, B, и p, легко определить соответствующее изменение скорости ветра, варьируя T (скажем, от 15 °С, 288К до 15,08 °С, 288,08 К). Для 10 м/с получаем 0,001 м/с. Это значение можно поставить непосредственно в последнюю графу таблицы, не ссылаясь на 3-ю и 4-ю графы, значения которых получены на базе более общего аналитического подхода	Отсутствуют	$c_{T,t} = 0,5v/k_{T,t}$, отсутствуют	0,001

Продолжение таблицы F.1

Источник ошибки, u_i	Описание	Значение, u_i	Значение коэффициента чувствительности, c_i	u_i c_i, м/с
$u_{T,s}$, коэффициент усиления сигнала датчика температуры, $k_{T,s}$	Предположим, что ток на выходе из датчика температуры передается на прецизионный резистор сопротивлением 500 Ом для получения от 2 В до 10 В на выходе для этого диапазона температуры. Таким образом, коэффициент усиления $k_{T,s}$ равен 2 мА/В. Предполагая, что резистор имеет стандартную погрешность 0,2 Ом, тогда для коэффициента усиления получаем соответствующую погрешность 0,0008 мА/В	0,0008	$c_{T,t} = 0,5\ v/k_{T,s} =$ $= 0,5\ 10/2 = 2,5$	0,002
$u_{T,d}$, цифровое преобразование сигнала температуры, $k_{T,d}$	Стандартная погрешность квантования для линии сигнала датчика давления в описанном выше случае составляет 0,000704 В. Для температуры 15 °С показываемое цифроаналоговой системой напряжение будет около 7,6 В, выдавая номинальное преобразованное значение 3113. Тогда погрешность преобразования $u_{T,d}$ — не более 0,0000023 В	0,0000023 В	$c_{T,d} = 0,5v/k_{T,d} =$ $0,5\ 10/0,00244 =$ $= 2049$	0,004
u_h, коэффициент насадки трубки Пито, C_h	Коэффициент насадки трубки Пито зависит от угла набегания ветра. Возможны два источника ошибок. Один связан с точностью совмещения трубок Пито со средним направлением воздушного потока, другой связан с изменениями турбулентности и мгновенным направлением воздушного потока. Допустим, что номинальный коэффициент насадки трубки Пито C_h, равен 0,997, и предположим также, что вычисленное среднее квадратическое отклонение по углу набегания воздушного потока равно 2°. Соответствующие стандарты ISO утверждают, что это дает увеличение коэффициента насадки трубки Пито на 0,1%	0,000997	$c_h = 0,5v/C_h =$ $0,5\ 10/0,997 = 5,015$	0,005
$u_{B,t}$, чувствительность барометра, $k_{B,t}$	Барометр можно рассматривать таким же образом, как был рассмотрен датчик температуры, так как он тоже будет иметь значительное физическое отклонение		$c_{B,t} = -0,5v/k_{B,t}$	
$u_{B,s}$, коэффициент усиления сигнала барометра, $k_{B,s}$	Подход аналогичен подходам, примененным при рассмотрении других параметров обработки сигнала		$c_{B,t} = 0,5v/k_{B,s}$	
$u_{B,d}$, цифровое преобразование сигнала барометра, $k_{B,d}$	Подход аналогичен подходам, примененным для других каналов сбора данных		$c_{B,d} = 0,5v/k_{B,d}$	

Окончание таблицы F.1

Источник ошибки, u_i	Описание	Значение, u_i	Значение коэффициента чувствительности, c_i	$u_i c_i$, м/с
S_A, статистическая погрешность средних значений в сериях периодов скоростей ветра	Допустим, интенсивность турбулентности составляет 2 % и используется выборка частотой 2 Гц в течение 30 с, тогда получаем 60 выборок. В этом случае стандартная погрешность среднего значения 10 м/с равна $\sqrt{1/60}\ 0{,}02\ 10$	0,026	1	0,026
u_ρ, поправка влажности по плотности, k_ρ или u_φ относительной влажности, φ	Можно показать, что $c_\rho^2 u_\rho^2$ эквивалентно $c_\varphi^2 u_\varphi^2$ (где u_φ — погрешность относительной влажности и c_φ — чувствительность полученной скорости ветра к влажности), если c_ρ доминирует над c_φ, а не c_B или c_T, что обычно бывает. Предположим, что относительная влажность φ измерена ручным способом и равна 50 %, при этом точность составляет 5 % при достоверности 95 %. В этом случае $\varphi = 0{,}5$ и $u_\varphi = 0{,}025$ $c_\varphi = \frac{d\bar{v}}{dk_\rho}\frac{dk_\rho}{d\varphi} = \frac{1}{2}\frac{\bar{v}}{k_\varphi} 0{,}378\frac{p_w}{B}$. При температуре 15 °С p_w = 1700 Па, допустим, что B = 1013 мбар = 101 300 Па. k_ρ оценена как 0,997 и c_φ (при 10 м/с) равна 0,032	$u_\varphi = 0{,}025$	$c_\varphi = 0{,}032$	0,001

В таблицу F.1 сведены последовательно все источники погрешностей, начиная с погрешностей типа В.

Во избежание повторений подробный анализ измерений барометрического давления не приводится, так как он аналогичен анализу измерений температуры.

Суммарную погрешность можно получить, взяв квадратный корень от суммы квадратов конкретных погрешностей в правой графе. Для указанных здесь значений суммарная погрешность составляет 0,07 м/с.

Пример показывает, что погрешность типа В склонна к доминированию. Увеличение периода калибровки может помочь снизить погрешность типа А, но не окажет при этом влияния на погрешность типа В. Кроме того, источники погрешности типа В, хотя и не зависимы друг от друга для конкретной скорости ветра, являются полностью коррелированными по скоростям ветра, а это означает, что можно получить хорошие видимые калибровки (хорошие прямые линии), получая при этом значительную погрешность.

Приложение G
(обязательное)

Установка оборудования на метеорологической мачте

G.1 Основные положения

Очень важно правильно расположить средства измерений на метеорологической мачте для обеспечения точности результатов при испытаниях ВЭУ. В частности анемометр должен быть расположен таким образом, чтобы искажения воздушного потока, особенно мачтой и поперечной балкой, были минимальными. Наименьшее искажение потока происходит при установке анемометра на вершине метеорологической мачты. При установке анемометров на балках вдоль мачты, необходимо учитывать искажение воздушного потока мачтой и балкой. Другие средства измерения следует устанавливать на уровне, максимально соответствующем высоте оси ветроколеса, но таким образом, чтобы избежать интерференции с анемометром.

G.2 Предпочтительный метод установки анемометра на вершине мачты

Размещение анемометра в верхней точке метеорологической мачты при отсутствии в непосредственной близости других приборов или оборудования является самым предпочтительным вариантом установки анемометра. Для обеспечения пренебрежимо малого возмущения воздушного потока в процессе выполнения измерений его скорости следует строго соблюдать все положения данного раздела.

Анемометр следует установить на вертикальной штанге цилиндрической формы, наружный диаметр которой имеет такой же размер, как при калибровке в аэродинамической трубе. Кабель к анемометру должен проходить внутри штанги. Угол отклонения от вертикали должен быть менее 2°; для установки рекомендуется использовать уклономер. Диаметр штанги не должен превышать размера корпуса анемометра. Штанга должна обеспечить расположение чашечек анемометра выше верхней точки конструкции метеорологической мачты и любого другого источника возмущения воздушного потока минимум на 0,75 м. Держатель, соединяющий анемометр с вертикальной штангой, должен быть компактным, гладким и симметричным. Если необходимо обеспечить элементам крепления анемометра пространственную устойчивость, то рекомендуется прикрепить вертикальную трубу небольшого диаметра к другой трубе большего диаметра таким образом, чтобы все элементы метеорологической мачты находились внутри конуса с углом конусности 1:5, вершина которого находится на высоте чашек анемометра. Другие измерительные приборы должны быть расположены ниже чашек анемометра и не ближе 1,5 м. Эти приборы и кронштейны для их крепления к балке могут выходить за пределы конуса 1:5. На рис. G.1 показан пример установки анемометра на вершине мачты.

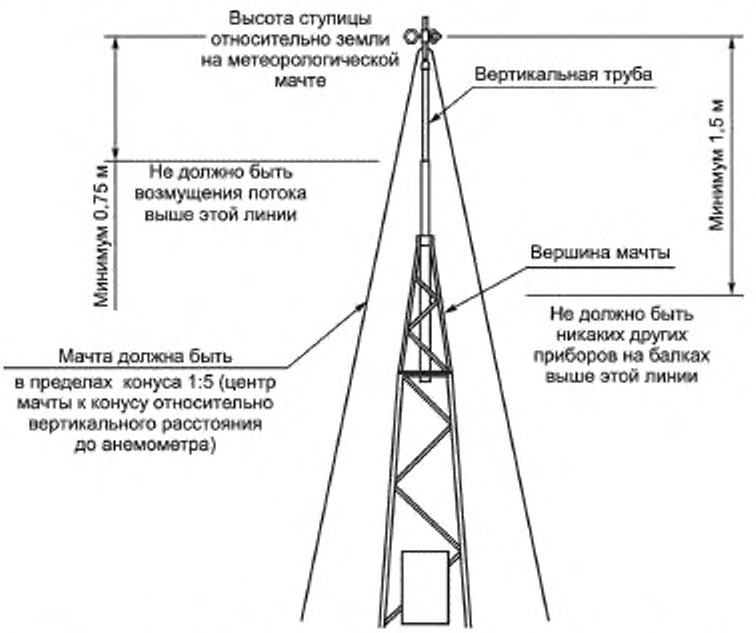


Рисунок G.I — Пример установки анемометра в верхней части мачты и требования к монтажу

G.3 Альтернативный метод крепления анемометра к верхней части мачты

Следует рассматривать альтернативные методы монтажа анемометра, чтобы не получать большие погрешности в измерениях скорости ветра из-за искажений потока. Относительно небольшое искажение получается при креплении к верхней точке мачты двух чашечных анемометров рядом друг с другом на некотором расстоянии от башни и друг от друга. В случае расположения рядом две вертикальные штанги и кронштейны для крепления анемометра должны удовлетворять требованиям G.2. Чашечки анемометра необходимо крепить выше балки на расстоянии, минимум в 15 раз превосходящем диаметр балки. Рекомендуется расстояние в 25 раз превышающее диаметр балки. Между анемометрами должно быть не менее 1,5 м, но не более 2,5 м. На рисунке G.2 показан

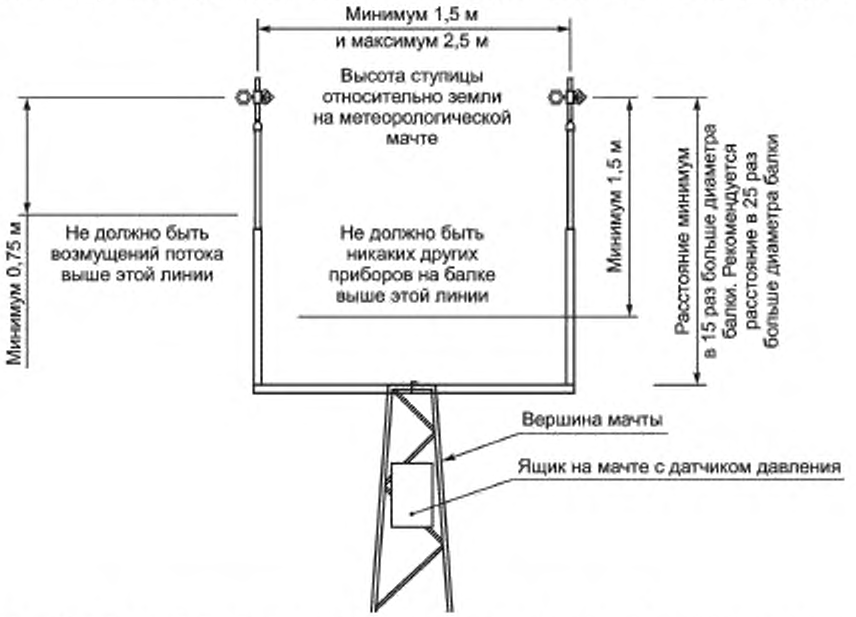


Рисунок G.2 — Пример альтернативного крепления основного и контрольного анемометров в верхней части мачты, а также флюгера и других приборов на балке

пример расположения анемометров рядом друг с другом. Основной чашечный анемометр следует выбрать до начала испытаний. Второй анемометр является контрольным. Сектор измерений необходимо ограничить таким образом, чтобы контрольный чашечный анемометр не воздействовал на основной чашечный анемометр. Необходимо определить погрешность искажения потока другими приборами, а также мачтой и балкой.

G.4 Молниезащита

Молниеотвод служит для защиты установленных в верхней части мачты приборов. Если должна быть установлена молниезащита, то следует принять следующие меры предосторожности:

- молниеотвод должен быть установлен в верхней части мачты таким образом, чтобы обеспечивать установленным на вершине анемометрам 60-градусный защитный зонтик, при этом анемометр никогда не должен попадать в зону возмущенного молниеотводом потока при направлениях ветра внутри сектора измерения;
- соответствующее заземление должно быть присоединено к основанию башни;
- необходимо выполнить оценку влияния искаженного воздушного потока на анемометр и прибавить дополнительную погрешность.

G.5 Установка прочего метеорологического оборудования

Если используется контрольный анемометр, то он должен быть установлен близко к основному анемометру для обеспечения хорошей корреляции между двумя приборами во время испытания. Эту корреляцию следует обосновать для гарантии того, что основной анемометр не меняет свою калибровку во время испытания. Однако контрольный анемометр может и не взаимодействовать с основным анемометром.

Флюгер должен быть установлен ниже основного анемометра минимум на 1,5 м, но в пределах 10 % высоты оси ветроколеса, считая ее как расстояние от уровня земли до места расположения на метеорологической мачте. Он должен быть установлен таким образом, чтобы внутри сектора измерений искажения воздушного потока были минимальными.

Датчики давления и температуры должны быть установлены на метеорологической мачте на высоте, близкой к высоте оси ветроколеса, но ниже основного анемометра минимум на 1,5 м. Датчик температуры должен быть установлен с затемнением от солнечного излучения. Датчик давления можно установить в защитном контейнере. При этом необходимо обеспечить соответствующую вентиляцию, чтобы на считывание показаний давления не влияло распределение давления вокруг контейнера.

Примеры допустимого расположения приборов на балке и крепления анемометров к верхней части мачты показаны на рисунках G.3 и G.4.

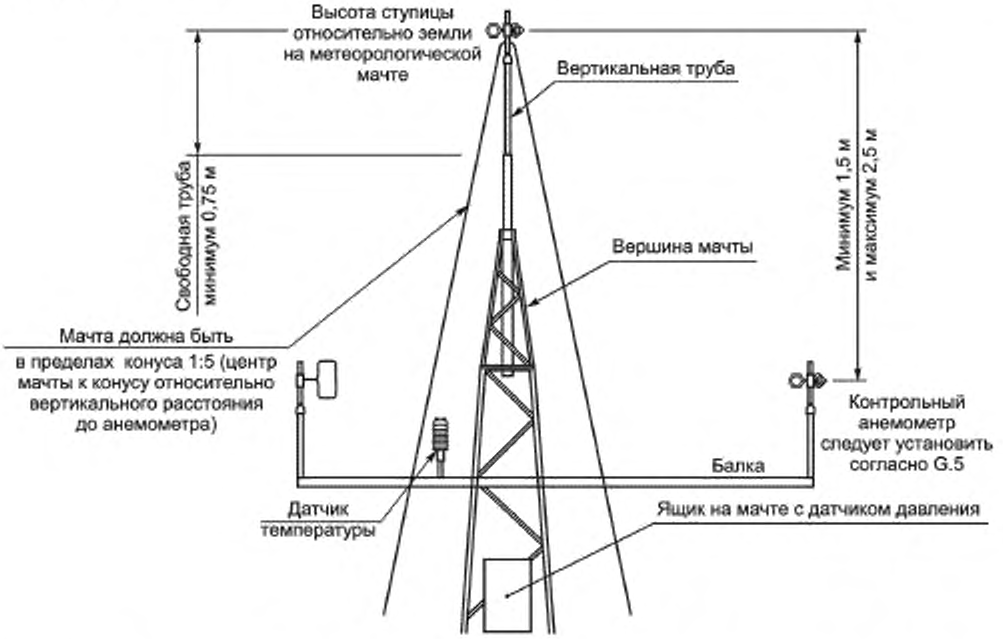


Рисунок G.3 — Пример крепления основного анемометра к верхней части мачты и монтажа контрольного анемометра, флюгера и других датчиков на балке

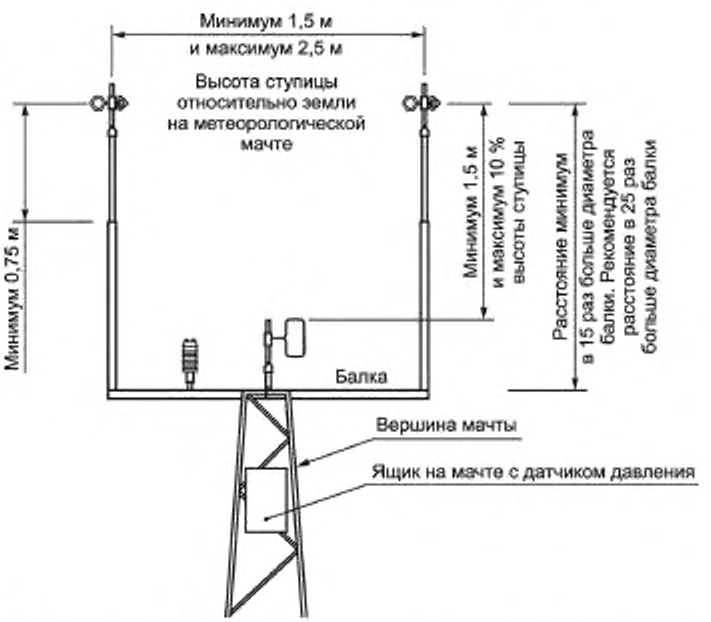


Рисунок G.4 — Пример крепления на одной линии основного и контрольного анемометров, а флюгера и других приборов на балке

G.6 Установка чашечных анемометров на балке

При расположении анемометра на балке происходит искажение воздушного потока, влияющее на чашечные анемометры как от мачты, так и от балки. Влияние круглой трубчатой балки равно 0,5 % при расположении плоскости вращения чашечек выше балки на расстоянии, равном 15 диаметрам балки. Искажение воздушного потока балкой необходимо обеспечить ниже 0,5 %.

Анемометр, работающий в зоне аэродинамического следа метеорологической мачты, испытывает сильные возмущения. Такие измерения нельзя использовать в определении показателей мощности. Искажение воздушного потока перед мачтой может быть значительным. Между чашечным анемометром и мачтой необходимо соблюдать расстояние, достаточное для снижения эффектов возмущения потока к допустимому низкому уровню. Руководство по выбору подходящего расстояния между вышкой и анемометром дано в G.6.1 и G.6.2.

Возмущенные воздушные потоки от растяжек вышки могут оказывать на весьма больших расстояниях сильное влияние на чашечные анемометры, поэтому следует избегать расположения чашечных анемометров в зоне растяжек.

Крайне важно для пользователя определить степень возмущения потока и, следовательно, допустимость погрешности, а цель состоит в том, чтобы избежать искажения потока на мачте и балке, превышающем 1 % и 0,5 % соответственно.

Конструкция метеорологической мачты может быть цилиндрической или решетчатой. Требуемое расстояние от анемометра до вышки зависит от типа мачты и ее аэродинамической проницаемости.

G.6.1 Трубчатые метеорологические мачты

Приближенное представление о картине возмущения потока в окрестности трубчатой мачты можно получить из рисунка G.5. На этом рисунке показано поле распределения скоростей обтекания трубчатой мачты, по-

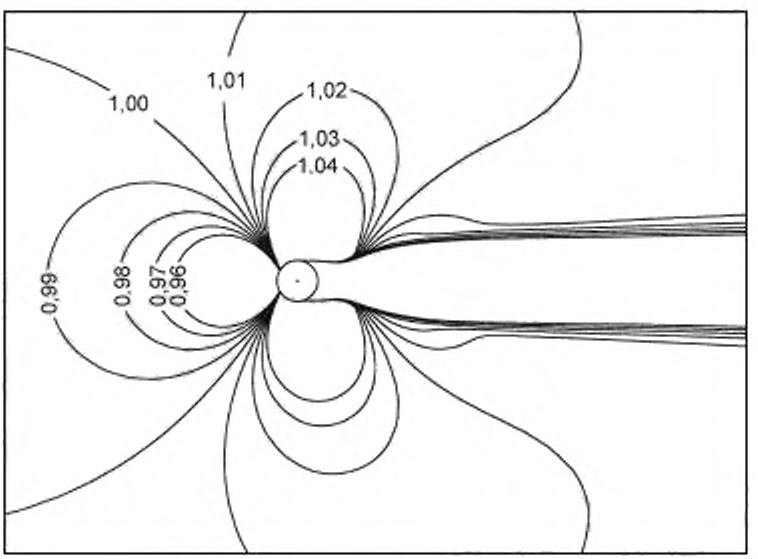


Рисунок G.5 — Поле распределения скоростей обтекания трубчатой мачты, нормализованное невозмущенным полем скоростей воздушного потока (слева); компьютерный расчет двумерных уравнений Навье — Стокса

лученных расчетом по уравнениям Навье—Стокса. Наименьшее возмущение возникает с наветренной стороны мачты в зонах, расположенных под углом 45°. В общем случае наблюдается замедление течения воздушного потока перед мачтой, ускорение течения вокруг нее и аэродинамический след за ней.

Для воздушных потоков с направлениями, не превышающими 45°по отношению к линии анемометр, — метеорологическая мачта, наибольшая относительная скорость потока наблюдается, когда потоки воздуха направлены вдоль линии анемометр — мачта.

На рисунке G.6 показана эта относительная скорость воздушного потока в функции расстояния. Следует обратить внимание на то, что искажение скорости воздушного потока может быть выше, чем показано на рисунке G.6, если потоки воздуха подходят под углами более 45° к линии анемометр — мачта.

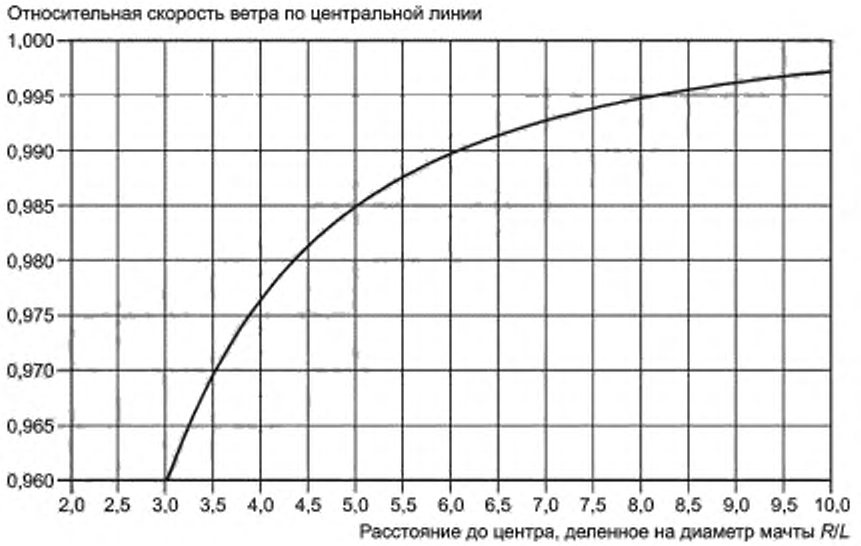


Рисунок G.6 — Относительная скорость ветра по центральной линии в функции от расстояния R до центра трубчатой мачты и диаметра мачты d

Видно, что относительная скорость ветра равна 99,5 % при R/d =8,2. Для получения относительной скорости ветра, равной 99 % , это число равно 6,1.

G.6.2 Метеорологические мачты решетчатой конструкции

Анализ воздушного течения вокруг решетчатой конструкции можно провести на основе применения теории вентиляторного диска и анализа Навье — Стокса. Степень возмущения воздушного потока зависит от аэродинамической плотности мачты, аэродинамического сопротивления ее отдельных элементов, направления воздушного потока и расстояния между точкой измерения и мачтой. На рисунке G.7 (вид сверху) показаны важные размеры мачты треугольной решетчатой конструкции.

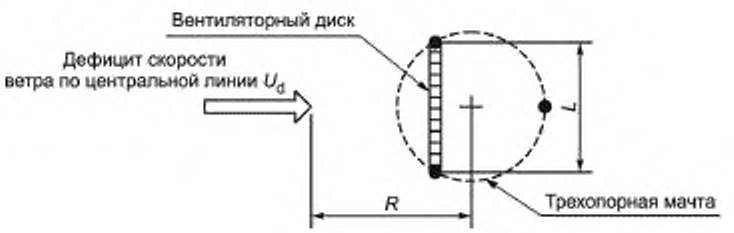


Рисунок G.7 — Представление трехопорной решетчатой мачты с указанием дефицита скорости ветра по центральной линии; представление вентиляторного диска мачты с шириной фронтальной поверхности L и расстоянием R от центра мачты до точки наблюдения

Искажение потока является функцией от коэффициента удельного аэродинамического сопротивления $C_т$, который в свою очередь зависит от аэродинамической плотности мачты и аэродинамического сопротивления отдельных ее элементов. $C_т$ можно рассматривать как равнодействующую силы сопротивления на единицу длины мачты, деленную на скоростной напор и ширину фронтальной поверхности.

На рисунке G.8 показано поле распределения скоростей воздушного потока вокруг решетчатой мачты с $C_т$ = 0,5. При обычных расстояниях до анемометра R, превышающих 2, возмущение данного потока очень слабо зависит от ориентации мачты (наветренная поверхность фронтальная или угловая), и поэтому его можно считать неизменным.

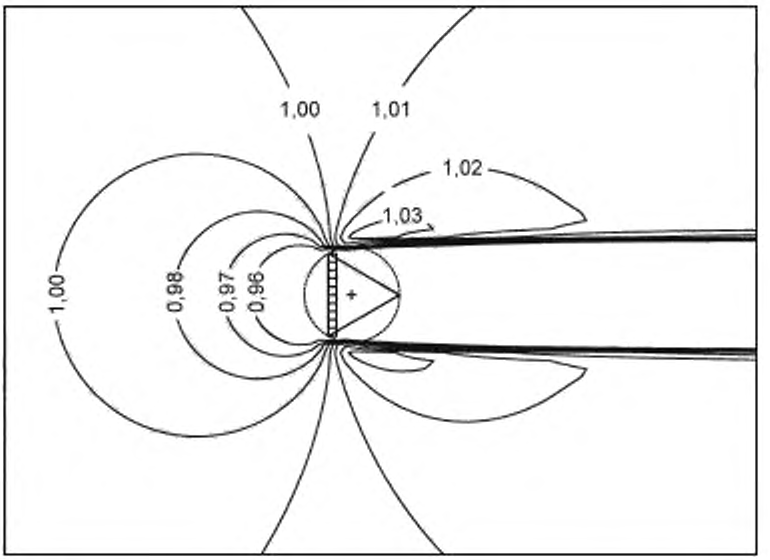


Рисунок G.8 — Поле распределения скоростей воздушного потока вокруг трехопорной решетчатой мачты с C_T = 0,5, нормализованное полем скоростей невозмущенного воздушного потока (слева): компьютерный расчет на основе двумерных уравнений Навье — Стокса и по теории вентиляторного диска

Если сектор измерений равен 90° или меньше, минимальное искажение получается при расположении анемометра под углом 90° к центру сектора измерений. Иными словами, искажение потока можно определить, учитывая снижение скорости набегающего воздушного потока в функции расстояния. На рисунке G.9 показаны расчетные относительные скорости ветра по центральной линии для решетчатых мачт с различными значениями C_T. Искажение скорости воздушного потока может быть выше, чем показано на рисунке G.9, если потоки воздуха подходят под углами более 100° к линии анемометр — мачта.

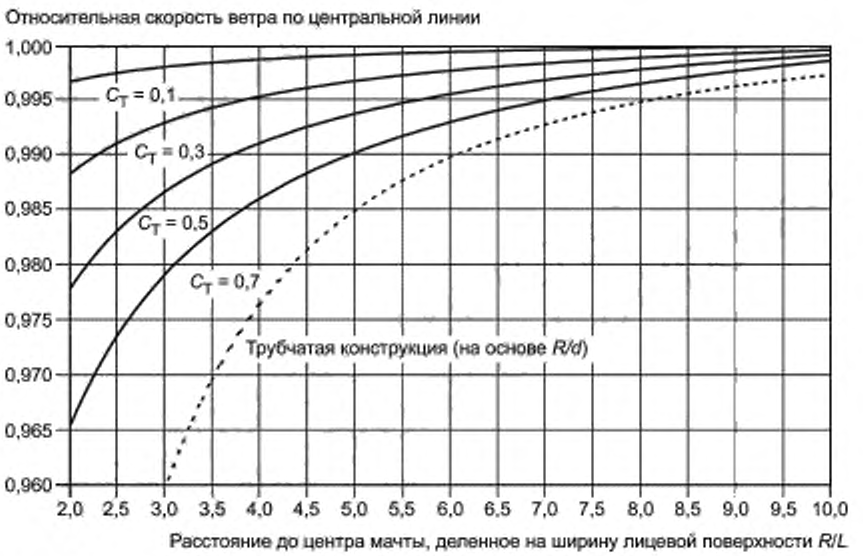


Рисунок G.9 — Относительная скорость ветра по центральной линии в функции расстояния R до центра трехопорной решетчатой мачты с шириной фронтальной поверхности L для различных значений C_T

Приведенное ниже уравнение можно использовать для оценки уменьшения скорости набегающего воздушного потока вдоль центральной линии U_d в функции от $C_т$ и R/L

$$U_d = 1 - \left(0{,}062C_т^2 + 0{,}076\right)\left(\frac{L}{R} - 0{,}082\right). \quad (G.1)$$

Значение $C_т$ может быть принято в соответствии с действующими строительными нормами РФ или из таблицы G.1 (внутри указанных пределов). В этой таблице аэродинамическая плотность t определяется как отношение площади проекции всех конструктивных элементов на боковую поверхность мачты к полной обдуваемой площади.

Таблица G.I — Метод оценки $C_т$ для различных типов решетчатой вышки

Тип мачты	Поперечное сечение	Выражение для $C_т$	Диапазон значений
Квадратное поперечное сечение, элементы с острыми краями		4,4 $(1 - t)t$	$0{,}1 < t < 0{,}5$
Квадратное поперечное сечение, округлые элементы		2,6 $(1 - t)t$	$0{,}1 < t < 0{,}3$
Треугольное поперечное сечение, круглые элементы		2,1 $(1 - t)t$	$0{,}1 < t < 0{,}3$

В качестве альтернативы, если определено максимальное уменьшение скорости воздушного потока по центральной линии, расстояние R можно получить из следующей формулы

$$R = \frac{L}{\dfrac{1 - U_d}{\left(0{,}062C_т^2 + 0{,}076C_т\right)} + 0{,}082}. \quad (G.2)$$

Для решетчатой мачты с $C_т = 0{,}5$ и уменьшением скорости воздушного потока по центральной линии в 99,5 % значение R должно в 5,7 раз превосходить расстояние между опорами мачты L. Дефицит скорости ветра в 99 % сократит расстояние R до значения, в 3,7 раза превосходящее расстояние между опорами мачты.

Приложение Н
(обязательное)

Эксплуатационные испытания ветроустановок малых и средних мощностей

При эксплуатационных испытаниях небольших ВЭУ требуется соблюдать специальные положения. В частности, ВЭУ, используемые для заряда батарей, необходимо испытывать в условиях, типичных для нормальной работы, но с уменьшением или подавлением влияния конфигурации и состояния конкретной батареи во время испытания.

Примечание — В международной практике создание, эксплуатация и испытания ВЭУ малой мощности регламентируются требованиями IEC 61400-2. При испытании небольших ВЭУ все требования, приведенные в данном стандарте, должны соблюдаться с учетом следующих изменений и дополнений:

a) в 5.1: при определении зарядных характеристик батарей система генерирования ВЭУ должна включать генерирующую установку, мачту для ВЭУ, блок управления и электрическую цепь между ВЭУ и нагрузкой. Система генерирования ВЭУ включает устройство регулирования заряда, которое является устройством защиты напряжения и которое снижает выработку энергии ВЭУ в случае полной зарядки батареи. Оно может включать балластную нагрузку, которая используется для рассеивания энергии ВЭУ, когда батареи полностью заряжены. Система генерирования ВЭУ не имеет аккумуляторной батареи, так как она считается частью нагрузки;

b) в 5.1: при определении выходных характеристик системы для электросети система генерирования ВЭУ должна включать генерирующую установку, мачту для ВЭУ, блок управления, электрическую цепь между ВЭУ и нагрузкой, регулятор заряда и балластную нагрузку (если используется), указанную выше. Кроме того, система может включать инвертор напряжения. Если между инвертором напряжения и электросетью установлен трансформатор, то его допускается считать либо частью системы генерирования ВЭУ, либо нагрузки;

c) также в 5.1: ВЭУ должна быть подключена к электрической нагрузке, представляющей собой нагрузку, для которой ВЭУ спроектирована. В случае применения ВЭУ для зарядки батарей нагрузка состоит из пакета аккумуляторных батарей, регулятора напряжения и устройства для рассеивания мощности, которая проходит через регулятор напряжения. В идеальной испытательной установке пакет аккумуляторных батарей не сохраняет энергию, производимую ВЭУ. Лучше, если вся энергия, производимая генераторной установкой, проходит через регулятор напряжения. Поэтому пакет аккумуляторных батарей может быть меньшего размера, чем обычно рекомендуется для ВЭУ, в то время как напряжение в месте подключения ВЭУ к нагрузке может поддерживаться в пределах технических требований, указанных ниже;

d) также в 5.1: ВЭУ необходимо устанавливать, используя монтажную систему, указанную производителем. Если ВЭУ поставляется без специальной монтажной системы, то генератор следует установить на высоте оси ветроколеса или хотя бы на высоте 10 м;

e) также в 5.1: для снижения расхождения в результатах из-за сопротивления электрической цепи между ВЭУ и нагрузкой подключение к нагрузке должно осуществляться не ближе, чем у основания мачты ВЭУ и не далее расстояния, равного утроенной высоте мачты. Характеристики электрической цепи между ВЭУ и нагрузкой должны соответствовать техническим требованиям производителя. Если в технических требованиях размеры проводника заданы диапазоном, то размер проводника следует подбирать как можно ближе к среднему значению диапазона. Если технические требования не приводятся, то размер проводника следует подбирать так, чтобы падение напряжения между генератором ВЭУ и нагрузкой составляло 10 % номинального напряжения при номинальной мощности;

f) также в 5.1: регулятор напряжения должен поддерживать напряжение в точке подключения ВЭУ к нагрузке в пределах 10 % настроек, указанных в таблице G.1, для всего диапазона выходной мощности ВЭУ. Среднее значение напряжения нагрузки за 1 мин должно быть в пределах 5 % настроек, указанных в таблице G.1, которые включаются в используемый набор данных;

g) в 5.2.1: если более целесообразна установка анемометра на длинной балке, прикрепленной к мачте ВЭУ, то отдельная метеорологическая мачта не требуется. Чтобы потенциально минимизировать влияние аэродинамического следа от анемометра, флюгера и элементов их крепления на ветроколесо малого диаметра, все такие компоненты необходимо размещать не ближе 3 м к любой части ветроколеса. Кроме того, конструкция крепления анемометра должна иметь минимальное аэродинамическое сопротивление в зоне, лежащей вниз от оси ветроколеса на 1,5 диаметра ветроколеса;

h) в 6.1: выходную мощность ВЭУ следует измерять в месте подключения нагрузки;

i) в 6.1: в дополнение к электрической мощности в месте подключения к нагрузке необходимо измерять напряжение, чтобы обеспечить соответствие требованиям, приведенным ниже;

j) в 6.4: датчик температуры воздуха и датчик давления воздуха необходимо устанавливать так, чтобы они находились, по крайней мере, на 1,5 диаметра ветроколеса ниже высоты оси ветроколеса, даже если такое крепление приведет к положению, которое будет находиться на высоте менее 10 м над уровнем земли;

k) в 6.6: мониторинг состояния малой ВЭУ требуется только тогда, когда блок управления ВЭУ выдает сообщение о неисправностях установки;

l) в 7.2: если регулятор заряда ВЭУ снижает выходную мощность установки при необязательной настройке на высокое напряжение, прибор можно настроить на более высокое напряжение. Если прибор отрегулирован, в отчете по испытаниям необходимо записать установки до и после настройки. Любые другие регулировки органов управления ВЭУ необходимо записывать в отчете;

m) в 7.3: данные перед обработкой должны считываться в течение 1 мин. Все последующие ссылки на наборы 10-минутных данных в стандарте должны применяться к наборам 1-минутных данных при испытаниях малых ВЭУ;

n) в 7.6: база данных считается полной, когда она удовлетворяет следующим критериям:

1) каждый бин скорости ветра между значением на 1 м/с ниже скорости отключения и 14 м/с должен содержать выборочные данные минимум из 10-минутного набора;

2) полная база данных включает, по меньшей мере, данные за 60 ч работы малой ВЭУ в пределах диапазона скоростей ветра,

3) для ВЭУ со складывающимися лопастями база данных должна включать полные бины скорости ветра с характеристиками работы, когда лопасти ВЭУ находятся в сложенном положении;

o) в 8.1: для ВЭУ с пассивным регулированием мощности, например складывание или флюгер лопасти, скорость ветра необходимо нормализовать при помощи уравнения (5) (регулирование скорости ветра), уравнения (6) (регулирование мощности) или другим методом. В случае использования альтернативного метода должна быть представлена документация, подтверждающая правомочность его использования;

p) в 8.3: если не предусмотрен останов малой ВЭУ при сильных ветрах, то измеряемое AEP (годовая выработка энергии) и планируемое AEP необходимо рассчитывать, приняв в качестве отключающей скорости наибольшую скорость ветра: наибольшее значение скорости ветра в заполненном бине скорости ветра или 25 м/с;

q) в разделе 9: в дополнение к требованиям, перечисленным в разделе 6, описания ВЭУ и испытательной установки должны включать:

1) размеры электропроводки, материал проводника, типы, длины и присоединительные муфты, используемые для подключения ВЭУ к нагрузке,

2) измеряемое сопротивление электропроводки между инвертором и нагрузкой или между ВЭУ и нагрузкой, если инвертор не используется,

3) настройки напряжения для устройств защиты от перенапряжения и падения напряжения, которые являются частью системы генерирования малой ВЭУ,

4) номинальное напряжение пакета аккумуляторных батарей (например, 12 В, 24 В, 48 В),

5) размер пакета аккумуляторных батарей, тип батареи и срок службы,

6) описание, включающее исполнение, модель и технические характеристики устройства регулирования напряжения, используемого для поддержания напряжения аккумуляторной батареи в указанных пределах;

r) рекомендуется получать дополнительные данные по рабочим характеристикам, чтобы количественно оценить изменения в напряжении аккумуляторной батареи, которые оказывают влияние на рабочие характеристики ВЭУ. Дополнительные графики выходной мощности должны быть получены на основе задания нестандартного низкого и высокого уровней напряжения аккумуляторной батареи в соответствии с таблицей Н.1. Сбор данных должен проводиться, по меньшей мере, в течение 30 ч, используя предварительное усреднение за 1 мин. При отражении графиков выходной мощности в отчетах таблицы и графики должны демонстрировать рабочие характеристики при дополнительных значениях низкого и высокого напряжения, при этом должны быть указаны величины установленного напряжения. Рекомендуется использовать единый график для отображения изменения мощности в зависимости от скорости ветра и напряжения аккумуляторной батареи.

Таблица Н.1 — Установки напряжения аккумуляторной батареи

Номинальное напряжение	Требуемое значение	Нестандартная низкая установка	Нестандартная высокая установка
12	12,6	11,4	14,4
24	25,2	22,8	28,8
36	37,8	34,2	43,2
48	50,4	45,6	57,6
Другое	2,1*	1,9*	2,4*
* Напряжение, В, на одном элементе батареи.			

Приложение I
(обязательное)

Классификация анемометров

I.1 Общие положения

Анемометр — это прибор, предназначенный для измерения скорости ветра. На анемометр воздействуют факторы окружающей среды, которые влияют на рабочие характеристики прибора, и, следовательно, на его показания. Общеизвестными факторами, оказывающими влияние на показания прибора, являются: турбулентность набегающего воздушного потока, температура, плотность воздуха и средний угол отклонения потока. Влияние этих факторов[1] и рабочих погрешностей должно быть определено в соответствии с приложением D (таблица D.1) для анемометров, используемых в измерениях показателей мощности. Метод отнесения анемометра к определенному типу, описанный в данном приложении, должен использоваться для расчета рабочих погрешностей.

Примечание — В международной практике в основу метода классификации положены те же подходы, которые используются для классификации датчиков мощности в международном стандарте МЭК 60688.

Оценка должна быть выполнена как минимум для двух экземпляров анемометров одного типа. Любое конструктивное изменение внешних очертаний анемометра или изменение его внутреннего устройства, которое может привести к изменению момента трения чашечного анемометра, требует новой оценки.

Прежде чем выполнить классификацию анемометра, предназначенного для испытаний характеристик мощности, рекомендуется проверить соответствие его геометрических размеров типовым размерам, приведенным в описании для классификации анемометров.

I.2 Диапазоны изменения коэффициентов влияния и классы

Применение диапазона изменения коэффициентов влияния должно осуществляться одним из двух способов. Первый способ основан на использовании диапазонов главных факторов влияния, из которых определяется номер класса *k*. Номер класса *k* связан с оценкой отклонений показаний анемометра путем изменения всех факторов влияния в пределах диапазона факторов влияния. Номер класса *k* должен определяться как максимальное отклонение показаний анемометра (от горизонтальной скорости ветра на входе) в диапазоне скорости ветра в соответствии с формулой[2]

$$w_i = 5m/s + 0{,}5 \cdot U_i$$
$$k = 100 \cdot \max \left| \varepsilon_i / w_i \right|, \qquad (I.1)$$

где w_i — весовая функция, определяющая границы отклонений;

$\varepsilon_{max,i}$ — максимальное отклонение для любого бина скорости ветра *i* в диапазоне скоростей ветра, м/с;

k — номер класса;

U_i — скорость ветра в бине *i*.

Диапазоны главных параметров делятся на два класса в зависимости от рельефа местности:

- класс А при удовлетворении требованиям приложения В к рельефу местности;
- класс В (диапазоны факторов влияния в соответствии с таблицей I.1) при необходимости калибровки площадки.

Таблица I.1 — Диапазоны параметров влияния (на основе усредненных значений, полученных за промежуток 10 мин) классов А и В

Параметр	Класс А Местность соответствует требованиям приложения В		Класс В Местность не соответствует требованиям приложения В	
	мин	макс	мин	макс
Диапазон измеряемой скорости ветра	4	16	4	16
Интенсивность турбулентности	0,03	0,12 + 0,48/V	0,03	0,12 + 0,96/V
Турбулентные составляющие $\sigma_u \sigma_v \sigma_w$[1]	1/0,8/0,5 (анизотропная турбулентность)		1/1/1 (изотропная турбулентность)	

[1] Другие известные факторы влияния — снег, лед и иней. Если эти факторы влияют на нормальную работу анемометра, погрешность из-за этих параметров следует также оценить.

[2] Номер класса 1 соответствует 1 % при скорости 10 м/с, но более 1 % при скорости ниже 10 м/с и менее 1 % при скорости выше 10 м/с.

Окончание таблицы I.1

Параметр	Класс А Местность соответствует требованиям приложения В		Класс В Местность не соответствует требованиям приложения В	
	мин	макс	мин	макс
Температура воздуха, °С	0	40	–10	40
Плотность воздуха, кг/м^3	0,9	1,35	0,9	1,35
Средний угол набегания воздушного потока, °	–3	3	–15	15
[1] Для оценки класса с помощью моделирования предполагается, что спектр ветра соответствует спектру ветра «Каймала» с масштабом продольной длины турбулентности 350 м в соответствии с IEC 61400-1				

Другой способ использования диапазонов параметров влияния состоит в установлении специального класса S с требуемым низким номером класса *k*, для которого диапазоны факторов влияния указываются отдельно. Диапазоны факторов влияния для класса S необходимо представить в таблице, аналогичной таблице I.1.

Выбор класса анемометра для конкретных измерений зависит от рельефа местности или точности, необходимой для выполнения измерения.

Класс А: назначается в случае соответствия рельефа местности требованиям приложения В и диапазонов главных факторов влияния данному типу рельефа местности.

Класс В: назначается в случае несоответствия рельефа местности требованиям приложения В и диапазонам главных факторов влияния для сложного рельефа местности.

Класс S: назначается, если требуется особая точность, когда диапазоны факторов влияния не могут быть учтены с заданной точностью анемометра. В качестве альтернативы класс можно связать с диапазонами факторов влияния, которые специально не охвачены классом А или классом В, или же с диапазонами факторов влияния, которые проверяются во время измерений показателей мощности[1].

Принадлежность анемометра к определенному классу устанавливается на основе номера класса *k* и типа класса: *k*A, *k*B, *k*S, например 1.7A или 2.5S. Рабочая стандартная погрешность в соответствии с таблицами D.1 и E.2 может быть выведена из обозначения класса анемометра в предположении прямоугольного закона ее распределения. В данном случае стандартная погрешность, предназначенная для использования в расчетах по определению погрешности измерений вырабатываемой мощности, представлена выражением

$$u_{V2,i} = \left(0{,}05 m/s + 0{,}005 \cdot U_i\right) \cdot k/\sqrt{3}\ . \qquad (I.2)$$

[1] Диапазоны параметров влияния, установленные во время измерения показателей мощности, включают уже измеренные параметры: скорость ветра, турбулентность, температуру воздуха, плотность воздуха. Среднее отклонение потока может быть определено в процессе калибровки площадки, на основе показаний двухкрыльчатого флюгера, или трехкоординатного акустического анемометра, смонтированного на метеорологической мачте на высоте оси ветроколеса.

Приложение J
(справочное)

Оценка чашечных анемометров

J.1 Общие положения

Оценку анемометров для классификации можно получить из испытаний в аэродинамических трубах, других лабораторных испытаний, полевых испытаний, а также моделированием и экстраполяцией. Для полной оценки следует провести испытания и в аэродинамической трубе и в полевых условиях; причем оба испытания должны быть взаимно перепроверены.

Оценка типа чашечного анемометра должна включать проверенные методики, учитывающие влияние основных характеристик, приведенных ниже, на работу чашечного анемометра:

- угловые характеристики;
- динамические эффекты вследствие различных характеристик ускоряющего и тормозящего момента ротора;
- момент трения в подшипниках.

В J.3 и J.4 показаны два примера оценки. В реальных условиях оценку типа чашечного анемометра можно получить на основе этих примеров. Допускается также применять и другие методы оценки, если они включают проверенные методики, учитывающие влияние основных характеристик.

J.2 Измерения характеристик чашечного анемометра

J.2.1 Угловые характеристики, измеряемые в аэродинамической трубе

Угловые реакции анемометра измеряются в аэродинамической трубе. Для трех скоростей ветра (произвольно распределенных в диапазоне от 4 до 16 м/с — рекомендуются значения 5, 8 и 12 м/с) угол наклона потока должен меняться по крайней мере в диапазоне от –30° до +30°. Угловые характеристики следует измерять с разрешающей способностью 2°. Пример, показывающий идеальную косинусную форму, показан на рисунке J.1.

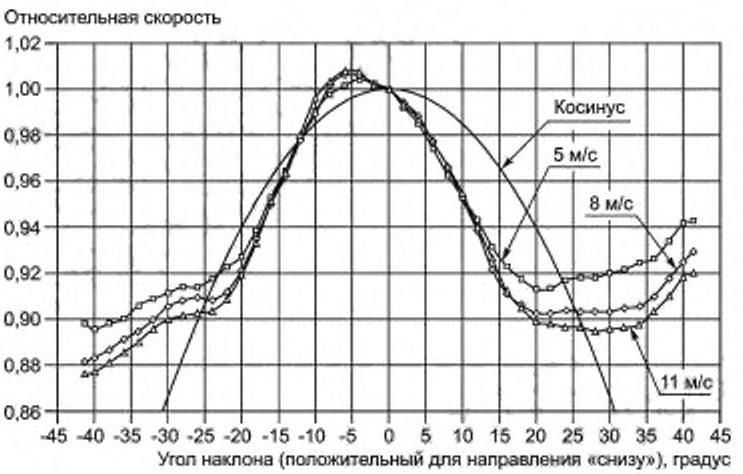


Рисунок J.1 — Измеренные угловые характеристики чашечного анемометра в сравнении с косинусной реакцией

J.2.2 Измерение ускоряющей и тормозящей силы в аэродинамической трубе

Момент на роторе чашечного анемометра можно измерить в аэродинамической трубе, прикрепляя вал небольшого диаметра к вершине ротора чашечного анемометра и вращая через этот вал чашечный анемометр с неустановившимися угловыми скоростями, сравнимыми со скоростью воздушного потока в аэродинамической трубе. Затем можно измерить реактивный момент на валу, который равен крутящему моменту ротора чашечного анемометра. Необходимо получить более детальные и точные результаты измерения в зоне, наиболее близкой к отношению установившихся скоростей. Пример измерения крутящего момента при постоянной скорости воздушного потока 8 м/с в аэродинамической и переменной угловой скорости вращения ротора показан на рисунке J.2.

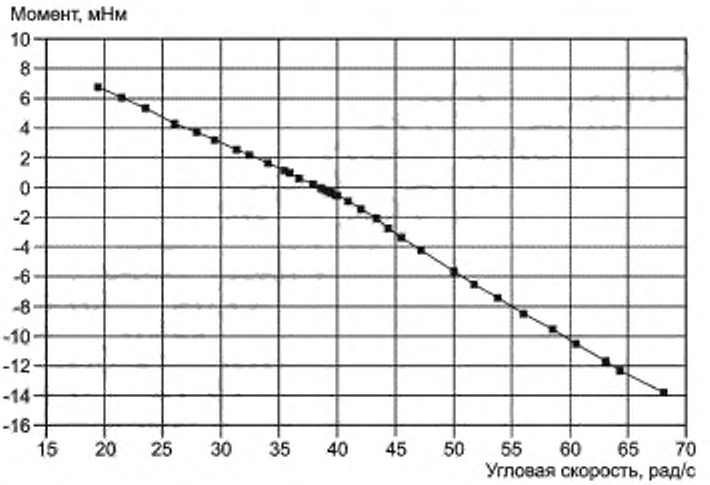


Рисунок J.2 — Измерения крутящего момента на чашечном анемометре в аэродинамической трубе при 8 м/с

J.2.3 Измерение момента силы трения в подшипниках

Измерения момента силы трения необходимо проводить с заменой ротора чашечного анемометра на маховик и путем измерения торможения от угловой скорости, соответствующей примерно 20 м/с. Моментами, действующими на ротор, являются момент силы трения в подшипниках и момент силы сопротивления маховика в потоке воздуха, который вычитается из измеренного момента. На рисунке J.3 показан пример измерений момента силы трения.

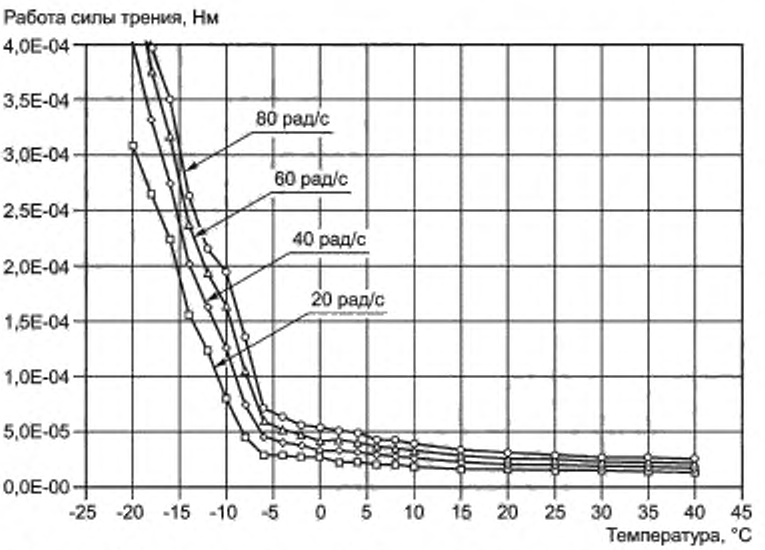


Рисунок J.3 — Пример измерений момента силы трения в подшипниках

J.2.4 Сравнительные испытания в полевых условиях

При сравнительных испытаниях в полевых условиях чашечный анемометр и трехмерный ультразвуковой анемометр, откалиброванный в аэродинамической трубе, должны быть установлены на вершине, как показано в G.2. Должны быть учтены только такие измерения, которые являются средними значениями за 10 мин и измерены в относительно небольшом секторе, перпендикулярном балке. Приемлемую базу данных необходимо собрать для некоторого диапазона изменения интенсивности турбулентности (например, от 0,04 до 0,14).

J.3 Метод оценки, основанный на сравнении результатов испытаний в аэродинамической трубе, лаборатории и в полевых условиях для чашечного анемометра класса S1

J.3.1 Угловая характеристика турбулентного воздушного потока для средних значений углов воздушного потока течения

J.3.1.1 Средний угол воздушного потока — 0°

Угловые реакции в турбулентном потоке необходимо вычислять для различных углов наклона среднего течения. Например, сначала следует рассмотреть вариант, в котором местность — плоская равнина, усредненное обтекание — горизонтальное (среднее течение наклонено под углом 0°). Турбулентность описывается своей интенсивностью

$$TI = \sigma_u / U, \qquad (J.1)$$

где σ_u — среднеквадратическое отклонение горизонтальной составляющей скорости ветра;

U — средняя горизонтальная скорость ветра.

Угловые характеристики чашечного анемометра в турбулентном потоке зависят от вертикальных составляющих турбулентного потока. Среднее квадратическое отклонение вертикальной составляющей скорости ветра меньше среднего квадратического отклонения горизонтальной составляющей (для целей классификации необходимо использовать соотношение $\sigma_v = 0{,}8\ \sigma_u$).

Вероятностное распределение для углов наклона воздушного потока (положительные значения для восходящего направления) устанавливается для различной интенсивности турбулентности в соответствии с рисунком J.4.

Влияние горизонтальной составляющей интенсивности турбулентности

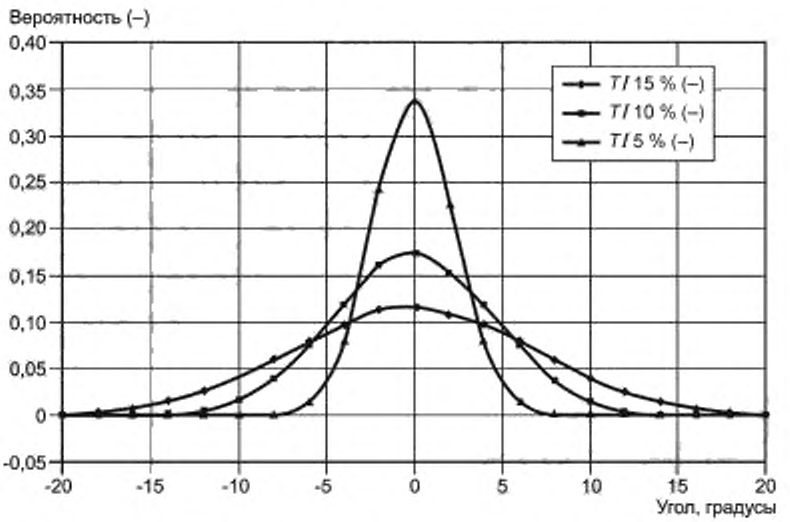
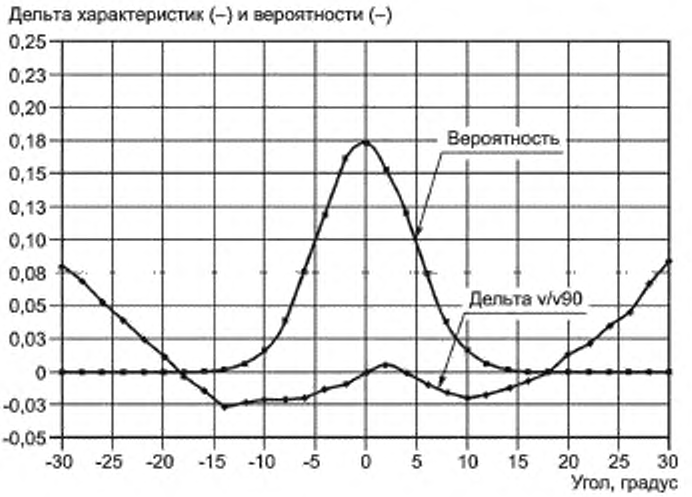


Рисунок J.4 — Распределение вертикальных составляющих скорости ветра в предположении фиксированного отношения между горизонтальным и вертикальным средними квадратическими отклонениями в скорости ветра

На следующем этапе значения вероятности, представленные на рисунке J.4, умножаются на разность между полученными угловыми характеристиками и соответствующими значениями идеальной кривой в форме косинуса, представленными на рисунке J.5. Вычисления проводятся для всех углов в соответствии с рисунком J.5a, в результате чего получаем значение, представляющее отклонение между классифицируемым и идеальным анемометром при определенной интенсивности турбулентности (например, 0,8 % для TI = 0,15 на рисунке J.4). Графики этих отклонений показаны на рисунке J.5b для полного диапазона интенсивности турбулентности вплоть до TI = 0,2.



a



b

Рисунок J.5 — Расчет общего отклонения по отношению к косинусной форме

J.3.1.2 Средние углы воздушного потока в диапазоне от –20° до +20°

Если средний угол наклона воздушного потока отличается от 0° для пересеченного рельефа местности, то вероятностная функция распределения углов течения будет максимальной при угле среднего течения, показанного на рисунке J.6.



Рисунок J.6 — Распределения вероятностей для трех различных средних углов набегания воздушного потока

Реакция анемометров должна быть рассчитана для средних углов набегания воздушного потока в диапазоне от –20° до +20° (с шагом в 5°) и изменяющейся интенсивности турбулентности флуктуаций в вертикальной скорости ветра, а отклонение от идеальной косинусной реакции необходимо зафиксировать в отчете в соответствии с рисунком J.7.



Рисунок J.7 — Общее отклонение от косинусной формы реакции для трех различных средних углов воздушного потока и интенсивности горизонтальной турбулентности

По этим результатам можно определить диапазоны средних углов воздушного потока и интенсивности турбулентности. Для этого необходим анемометр класса 1. В пределах этих рабочих диапазонов классифицированный чашечный анемометр дает отклонение менее 1 % идеальной косинусной характеристики.

J.3.2 Динамические эффекты, обусловленные неустановившимся течением

Кроме вышеописанных эффектов, возникающих вследствие угловых характеристик чашечного анемометра при условиях неустановившегося воздушного потока, некоторые анемометры отличаются еще одним динамическим эффектом, часто называемым аэродинамическим завышением скорости. Этот эффект необходимо классифицировать в полевых испытаниях.

Сравнение проводится в полевых условиях на высоте 30 м. Классифицируемый чашечный анемометр следует сравнить с калиброванным ультразвуковым анемометром. Следует измерить и зафиксировать в отчете эффект завышения скорости (выражаемый в виде разницы наклонов между чашечным и ультразвуковым анемометром) в зависимости от интенсивности турбулентности, см. рисунок J.8.

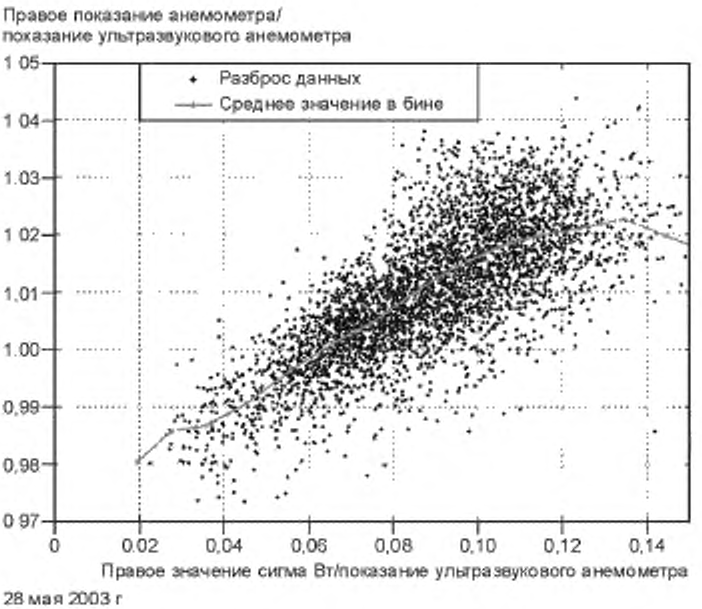


Рисунок J.8 — Пример анемометра, для которого не выполняется критерий наклона

У анемометра класса 1 наклон должен быть < 0,05, что соответствует эффекту завышения скорости менее чем 1 % для диапазона интенсивности турбулентности до 0,2 (20 %).

J.3.3 Трение в подшипниках

Калибровки анемометров в аэродинамических трубах часто проводятся при комнатных температурах окружающего воздуха, тогда как анемометры эксплуатируются в широком диапазоне температур. Следует изучить отклонения выходных характеристик анемометра при таких изменениях температуры. Отклонение анемометра класса 1 должно быть не более 1 % в пределах диапазона рабочих температур. Поскольку отклонения согласно вышеуказанным методикам могут быть отрицательными или положительными, у анемометра класса 1 общее отклонение при измерениях графика выходной мощности не должно превышать 1 % в пределах рабочих диапазонов факторов влияния.

J.4 Метод оценки на основе лабораторных испытаний и испытаний в аэродинамических трубах и моделирования чашечного анемометра

J.4.1 Описание метода

Данный метод основан на измерениях основных характеристик чашечного анемометра в аэродинамической трубе и лабораторных условиях, а также на численных расчетах с помощью модели чашечного анемометра и данных искусственного воздушного потока для определения характеристик реакции для всех диапазонов факторов влияния.

J.4.2 Моделирование чашечного анемометра

Соответствующая модель чашечного анемометра позволяет определить результаты изменения любого параметра набегающего воздушного потока на основе измеренных основных характеристик чашечного анемометра:

- нормальной проверенной калибровки;

- угловых характеристик;
- коэффициентов трения в зависимости от отношения скоростей и моментов; а также нескольких физических характеристик: момента инерции ротора, площади одной чашечки и радиуса до центра чашечек. Рекомендуется использовать следующую модель.

Реакция чашечного анемометра рассчитывается на основе дифференциального уравнения вращающего момента, где момент на роторе представляет собой сумму аэродинамического момента и момента трения

$$I\,\frac{d\omega}{dt} = Q_A + Q_f\,. \tag{J.2}$$

Аэродинамический момент Q_A является функцией вектора мгновенной скорости ветра $U = \{u, v, w\}$ с углом набегания и скалярной величиной скорости воздушного потока

$$\alpha = \arctan\frac{w}{\sqrt{u^2+v^2}}\,,\quad \left|\dot{U}\right| = \sqrt{u^2+v^2+w^2}\,. \tag{J.3}$$

Эквивалентная горизонтальная составляющая скорости ветра может быть определена на основе угловых характеристик, угла набегающего воздушного потока и скалярной величины скорости ветра

$$U_{eq} = F_\alpha\left(\alpha, \left|\dot{U}\right|\right)\left|\dot{U}\right|. \tag{J.4}$$

Теперь можно выразить аэродинамический момент

$$Q_A = \frac{1}{2}\,\rho A R U_{eq}^2\, C_{QA}\,(\lambda), \tag{J.5}$$

где ρ — плотность воздуха;

A — площадь одной чашечки;

R — радиус расположения чашечек;

U_{eq} — эквивалентная горизонтальная скорость ветра;

U_t — пороговая скорость ветра (получаемая как остаток от калибровочного сдвига после вычитания влияния трения; если трение равно нулю, пороговая скорость ветра равна калибровочному сдвигу);

C_{QA} — коэффициент обобщенного аэродинамического момента вращения ротора.

Коэффициент обобщенного аэродинамического момента вращения ротора можно получить по измерениям момента в аэродинамической трубе, где U_{eq} в данном случае равняется скорости воздушного потока в трубе

$$C_{QA} = C_{QA}\,(\lambda) = \frac{Q_A}{\frac{1}{2}\,\rho A R U_{eq}^2}\,. \tag{J.6}$$

Коэффициент обобщенного аэродинамического момента вращения ротора является функцией отношения скоростей

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_{eq} - U_t}\,. \tag{J.7}$$

Момент трения — это функция от температуры и скорости вращения, — получаемый по измерениям сил трения

$$Q_f = Q_f\,(T, \omega). \tag{J.8}$$

J.4.3 Воздействие диапазонов изменения факторов влияния и определения классов

Диапазоны параметров влияния могут быть изменены при использовании модели турбулентности, которая генерирует искусственный трехмерный воздушный поток. Воздействуя на модель чашечного анемометра таким искусственным ветром в течение 10 мин, можно определить характеристики реакции анемометра. Отклонение от

точного значения, которое выводится из того же набора данных измеренной скорости ветра, определяется для всех диапазонов факторов влияния, а по полученным отклонениям определяют класс. На рисунке J.9 показан пример полученных отклонений при изменениях диапазона факторов влияния класса А. В результате оценки чашечный анемометр получает класс 2.0А.

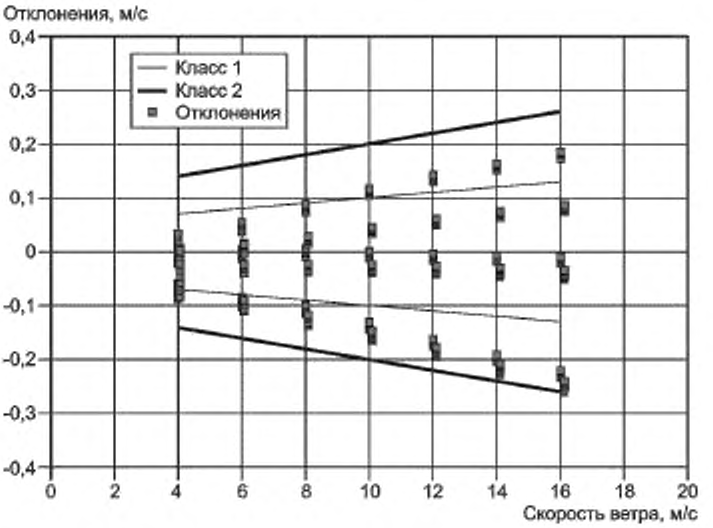


Рисунок J.9 — Пример отклонений для чашечного анемометра класса 2.0А

Приложение К
(справочное)

Сравнение характеристик анемометров, используемых для проведения испытаний

К.1 Общая информация

Во время проведения измерений необходимо доказать, что используемый анемометр для получения измерений графика выходной мощности, не изменяет свою калибровку. Анемометр можно откалибровать в аэродинамической трубе после проведенных измерений, чтобы показать разницу с первой калибровкой. Другая возможность — так называемое сравнение на месте, проводимое сравнением основного анемометра с контрольным анемометром, установленным поблизости к нему во время измерений. Этим методом невозможно определить постепенное ухудшение калибровки анемометра, если калибровка контрольного анемометра ухудшается такими же темпами.

К.2 Предварительные условия

Во время проведения полномасштабных измерений на метеорологической мачте должны быть установлены два анемометра согласно приложению G. Основной анемометр используется для измерений рабочих характеристик. Другой, контрольный анемометр, используется для выполнения сравнения. Анемометры можно устанавливать по одному из 2 вариантов:

- Вариант 1: установка на вершине мачты согласно G.2.
- Вариант 2: альтернативная установка на вершине мачты согласно G.3.

К.3 Реализация

Учитываются все усредненные за 10-минутный период значения, записанные во время измерений. Данные фильтруются для узкого сектора направления ветра (например, ± 20° или ± 40° с центром 90° к балке в зависимости от сектора измерений) и в диапазоне скорости ветра от 6 до 12 м/с. Соотношение между измерениями двух анемометров следует проанализировать по методу «бин для бинов» в 1 м/с (скорость ветра по контрольному анемометру).

Начиная с первой части периода измерений и до окончания всех бинов в 1 м/с (по крайней мере, три значения на бин и максимум за восемь недель), линейная регрессия выполняется с контрольным анемометром в качестве зависимой переменной и основного анемометра, используемого для измерений графика выходной мощности, в качестве независимой переменной.

После определения коэффициентов линейной регрессии можно использовать следующую формулу

$$V_{control_corr} = mV_{control} + b\ .$$

В зависимости от типов анемометров может возникнуть необходимость использовать формулу более высокого порядка для лучшей подгонки. Цель — показать возможные изменения в поведении анемометра во времени, т.е. провести не абсолютную калибровку.

К.4 Критерии оценки

Повторная калибровка основного анемометра в аэродинамической трубе после периода измерений не обязательна, если соблюдаются следующие два критерия (должны анализироваться только данные, которые были записаны после выполнения линейной регрессии):

a) имеются, по крайней мере, 30 мин выборочных данных на бин;

b) средние значения различий в данных по скорости ветра (систематическое отклонение) скорректированного контрольного анемометра ($V_{control_corr}$) и основного анемометра ($v_{primary}$) вычисляются для каждого бина скорости ветра. Кроме того, стандартные погрешности различий в данных по скорости ветра (статистическое отклонение) скорректированного контрольного анемометра ($V_{control_corr}$) и основного анемометра вычисляются для каждого бина скорости ветра. Стандартная погрешность в различиях скорости ветра вычисляется в каждом бине скорости ветра как среднее квадратическое отклонение различий скоростей ветра, деленное на квадратный корень числа точек данных на бин скорости ветра. Сумма квадратов систематического отклонения и статистического отклонения должна быть менее 0,1 м/с для каждого бина скорости ветра

Приложение ДА
(обязательное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам Российской Федерации, использованным в настоящем стандарте в качестве нормативных ссылок

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного национального стандарта Российской Федерации	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного стандарта
ГОСТ 7746 — 2001	MOD	IEC 60044-1:1996 «Измерительные трансформаторы — Часть 1: Трансформаторы тока»
ГОСТ 1983 — 2001	MOD	IEC 60044-2:1997 «Трансформаторы измерительные. Часть 2: Индуктивные трансформаторы напряжения»
ГОСТ 24855 — 81	NEQ	IEC 60688:1992 «Преобразователи электрические измерительные для преобразования электрических параметров переменного тока в аналоговые или цифровые сигналы»
ГОСТ 14014 — 91	NEQ	IEC 60688:1992 «Преобразователи электрические измерительные для преобразования электрических параметров переменного тока в аналоговые или цифровые сигналы»
ГОСТ 4401 — 81	NEQ	ИСО 2533:1975 «Атмосфера стандартная (от — 2 до 32 км идентична стандартным атмосферам ИКАО и ВМО)»

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

УДК 001.4:620.9:006.354 ОКС 27.180

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, ветроэнергетика, установки ветроэнергетические, метод измерения вырабатываемой мощности, анализ показателей мощности ветроэлектрических установок, отчетная документация

Редактор *Е. В. Вахрушева*
Технический редактор *Н. С. Гришанова*
Корректор *С. В. Смирнова*
Компьютерная верстка *В. Н. Романовой*

Сдано в набор 02.11.2012. Подписано в печать 09.01.2013. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Ариал. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,84. Уч.-изд. л. 8 80. Тираж 112 экз. Зак. 1715.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 123995 Москва. Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru
Набрано и отпечатано в Калужской типографии стандартов. 248021 Калуга, ул. Московская, 256.

gost.e-ecolog.ru