ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО 10816-21— 2021

Вибрация

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАШИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ВИБРАЦИИ НА НЕВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЯХ

Часть 21

Ветрогенераторы горизонтально-осевые с коробкой передач

(ISO 10816-21:2015, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2022

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Закрытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (ЗАО «НИЦ КД») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 183 «Вибрация, удар и контроль технического состояния»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2021 г. № 1638-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 10816-21:2015 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 21. Ветрогенераторы горизонтально-осевые с коробкой передач» (ISO 10816-21:2015 «Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 21: Horizontal axis wind turbines with gearbox», IDT).

Международный стандарт разработан Техническим комитетом ISO/TC 108 «Вибрация, удар и контроль состояния», подкомитетом SC 2 «Измерения и оценка вибрации и ударов применительно к машинам, транспортным средствам и сооружениям».

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные и межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

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

© ISO, 2015
© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022

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 2
3 Термины и определения 2
4 Общие принципы 2
4.1 Измеряемые величины и контролируемые параметры 2
4.2 Параметры для оценки вибрационного состояния ветрогенератора 3
4.3 Период измерений 3
5 Организация проведения измерений 4
5.1 Общие положения 4
5.2 Мачта и гондола 4
5.3 Подшипник ротора 4
5.4 Коробка передач 5
5.5 Электрогенератор 5
5.6 Требования к средствам измерений 5
5.7 Крепление преобразователей вибрации 6
5.8 Условия работы во время измерений 6
6 Критерии оценки вибрационного состояния 7
6.1 Общие положения 7
6.2 Границы зон вибрационного состояния 7
6.3 Изменения контролируемых параметров 8
7 Данные, использованные для построения границ зон 8
8 Установление предельных уровней вибрации 8
8.1 Общие положения 8
8.2 Уровень УВЕДОМЛЕНИЯ 8
8.3 Уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ 9
8.4 Уровень ОСТАНОВА 9
9 Общие сведения о системах контроля состояния 9
9.1 Контроль широкополосной вибрации 9
9.2 Системы контроля состояния ветрогенераторов 9
Приложение А (рекомендуемое) Границы зон вибрационного состояния 10
Приложение В (рекомендуемое) Две конструкции ветрогенератора с коробкой передач 11
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным и межгосударственным стандартам 13
Библиография 14

Введение

Рекомендации базовых стандартов в отношении оценки вибрационного состояния машин широкого класса не могут быть непосредственно применены к ветрогенераторам ввиду специфических особенностей их конструкции и условий работы. Вибрация мачты и гондолы ветроэнергетической установки под действием ветра, изменение потока воздуха мачтой установки, собственные колебания лопаток турбины и конструкции установки (мачты с фундаментом) — все это отличается от обычно рассматриваемой вибрации машины.

Общий подход к оценке вибрационного состояния машин, который может быть применен к отдельным узлам ветрогенератора (подшипникам ротора, коробке передач, электрогенератору), установлен ИСО 10816-1. В отношении промышленных агрегатов разного вида данная методология была развита ИСО 10816-3. Однако ветрогенераторы не входят в область применения последнего стандарта.

Критерии оценки вибрации, используемые в стандартах серии ИСО 10816, в принципе могут быть применены и к узлам ветрогенератора. Однако это относится только к оценке вибрации, произведенной самой машиной и непосредственно воздействующей на ее элементы. Эти критерии применимы также к оценке вибрации, распространяемой вовне ветрогенератора, но их нельзя использовать для оценки вибрации, передаваемой на ветрогенератор от внешних источников. К такой вибрации относится вибрация от мачты и гондолы ветроэнергетической установки, возбуждаемых ветром, а в случае морской установки — также волнением моря. Ввиду того, что лопасти турбины и сама мачта обладают значительной гибкостью, а турбина установки вращается с малой скоростью, при оценке вибрации необходимо учитывать составляющие в низкочастотной области.

Требование измерять и оценивать низкочастотную вибрацию узлов, возбуждаемую периодическими и случайными процессами, требует модифицировать рекомендации ИСО 10816-3. Ситуацию еще более усложняет воздействие ветра и волн, которые обусловливают появление значительных колебаний конструкции ветрогенератора также в низкочастотной области.

Сильная вибрация ветрогенератора вызывает значительные механические напряжения в его элементах и влияет таким образом на его эксплуатационную надежность и срок службы. Этим вызван интерес к разработке единого подхода к оценке вибрационного состояния ветрогенератора и его узлов со стороны заинтересованных лиц, в число которых входят изготовитель установки, ее владелец, обслуживающая организация и т. п. Настоящий стандарт посвящен решению этой задачи.

Настоящий стандарт устанавливает общие требования к измерениям вибрации, обеспечивающим возможность оценки вибрационного состояния ветрогенератора и сопоставления с вибрацией аналогичных установок.

Превышение установленных стандартом границ зон вибрационного состояния дает основание для принятия соответствующих мер в отношении узлов ветрогенератора и самого ветрогенератора в целом, однако стандарт при этом не дает рекомендаций по выявлению причин повышенной вибрации. Если вибрация остается в пределах заданной зоны, то в целом работа установки рассматривается как нормальная, однако это не исключает возможность наличия повреждений отдельных элементов. Установленные границы зон вибрационного состояния не предназначены для использования в целях приемки, правила которой подлежат отдельному согласованию между изготовителем и пользователем.

В настоящем стандарте рассматриваются ветрогенераторы с горизонтально установленной турбиной, лопасти которой неподвижно закреплены на ступице ротора или могут поворачиваться вокруг своей оси. Ступица соединена с трансмиссией ветрогенератора. Механическая энергия вращения турбины преобразуется в электрическую энергию электрогенератором с приводом либо непосредственно от турбины, либо через коробку передач. Как правило, трансмиссия генератора размещена в гондоле ветроэнергетической установки. Подшипники гондолы позволяют ей вращаться вокруг мачты, установленной на собственном фундаменте.

Лопасти ротора, а следовательно, и сам ротор подвергаются воздействию не только асимметричного входного потока воздуха, но также случайным флуктуациям ветра. Асимметрия входного потока является следствием завихрений и порывов ветра, эксцентричного входа потока в турбину, а также разности скоростей воздушного потока по поверхности ротора. Помимо аэродинамических нагрузок на поведение ветрогенератора влияют силы инерции и нагрузки, определяемые разными условиями его работы. Внешние условия и режим работы ветрогенератора, характеризуемый выходной мощностью и скоростью вращения турбины, в совокупности с особенностями конструкции ветрогенератора и его узлов определяют переменные нагрузки на турбину, трансмиссию, мачту и фундамент, что в результате выливается в вибрацию отдельных узлов ветрогенератора.

Конструкция трансмиссии ветрогенератора также изменяется от установки к установке. Она может возбуждать вибрацию, которая зависит или не зависит от скорости вращения турбины. От особенностей конструкции, а также от особенностей установки ветрогенератора зависит не только вибрация отдельных узлов (электрогенератора, коробки передач, муфты сцепления), но также их влияние друг на друга. Так, повышенная вибрация и удары в зубчатых зацеплениях могут быть следствием несоосности этих узлов. Также уровень вибрации будет зависеть от резонансов трансмиссии. С учетом всех этих обстоятельств понятно, что оценивать вибрацию необходимо для всей установки в целом, т. е. трансмиссии ветрогенератора, включая турбину, гондолы и мачты.

С учетом большого влияния конструкции трансмиссии на вибрационное поведение ветрогенератора различают оценку вибрационного состояния для двух групп горизонтально-осевых ветрогенераторов:

- группа 1: с коробкой передач;
- группа 2: без коробки передач.

В настоящем стандарте рассматриваются ветрогенераторы первой группы.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Вибрация

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАШИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ВИБРАЦИИ НА НЕВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЯХ

Часть 21

Ветрогенераторы горизонтально-осевые с коробкой передач

Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
Part 21. Horizontal axis wind turbines with gearbox

Дата введения — 2022—06—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает метод оценки вибрационного состояния ветрогенераторов и их узлов по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Он распространяется на горизонтально-осевые ветрогенераторы с коробкой передач с номинальной выходной мощностью свыше 200 кВт, обладающие следующими конструктивными особенностями и рабочими характеристиками:

a) опорная система ветрогенератора (мачта и фундамент) изготовлены из стали и/или бетона;

b) турбина ветрогенератора расположена горизонтально и имеет несколько лопастей;

c) ротор ветрогенератора опирается на подшипники, установленные отдельно или встроенные в корпус коробки передач;

d) электрогенератор ветрогенератора приводится в действие через коробку передач;

e) электрогенератор может быть синхронным или асинхронным (обычно с четырехполюсной обмоткой);

f) электрогенератор имеет фиксированное число полюсов (с возможным их изменением только при регулировке частоты вращения);

g) выходная мощность регулируется изменением положения или конструкцией лопастей турбины;

h) электрогенератор соединен с электросетью напрямую или через инвертор.

Настоящий стандарт дает рекомендации по формированию зон вибрационного состояния для непрерывной работы ветрогенератора под нагрузкой. Однако следует иметь в виду, что в большинстве случаев оценка вибрационного состояния не предоставляет необходимой информации для раннего обнаружения неисправностей и диагностирования. В настоящее время невозможно численно определить границы зон вибрационного состояния для всех ветрогенераторов ввиду большого разнообразия их видов и применений, однако в приложении А приведены ориентировочные значения границ зон для прибрежных ветрогенераторов. Эти границы, полученные по результатам анализа данных с почти 1000 ветроэнергетических установок мощностью до 3 МВт, могут служить основой для диалога между изготовителем и пользователем установки. Аналогичных рекомендаций в отношении морских ветрогенераторов пока не существует.

Примечание 1 — В отношении контроля состояния и диагностирования ветрогенераторов — см. [9].

Настоящий стандарт не распространяется на оценку качества балансировки тихоходных турбин, которые требуют применения специальных методов измерений и анализа.

Издание официальное

Наличие крутильных колебаний трансмиссии ветрогенератора приводит в общем случае к повышению вибрации, измеряемой в соответствии с настоящим стандартом. Однако измерения и оценка крутильных колебаний также требуют использования специальных методов, не относящихся к области применения настоящего стандарта.

Примечание 2 — Измерения механических нагрузок в опорных конструкциях и лопастях турбины рассматриваются в [13], методы обнаружения дефектов подшипников качения и неисправностей в коробке передач — в [8], измерения и оценка вибрации, производимой дефектными подшипниками, — в [15].

Настоящий стандарт не предназначен для использования в приемочных испытаниях коробки передач и электрогенераторов ветрогенератора на стендах изготовителя.

Примечание 3 — Рекомендации по таким испытаниям приведены в [5] и [10].

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты [для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированных — последнее издание (включая все изменения)]:

ISO 2041, Mechanical vibration, shock and condition monitoring — Vocabulary (Вибрация, удар и контроль состояния. Словарь)

ISO 2954, Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery — Requirements for instruments for measuring vibration severity (Вибрация машин вращательного и возвратно-поступательного действия. Требования к средствам измерений для оценки вибрационного состояния)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО 2041, а также следующие термины с соответствующими определениями.

Примечание — Специальные термины в отношении ветрогенераторов, их узлов и характеристик приведены в [11].

ИСО и МЭК ведут терминологические базы данных для использования в стандартизации по следующим адресам:

- Платформа онлайн-просмотра ИСО: доступна на gost.e-ecolog.ru ;
- Электропедия МЭК: доступна на gost.e-ecolog.ru .

3.1 **контролируемое ускорение** (assessment acceleration) a_{w0}: Среднеквадратичное значение ускорения в широкой полосе частот на заданном интервале времени, используемое для оценки вибрационного состояния.

3.2 **контролируемая скорость** (assessment velocity) v_{w0}: Среднеквадратичное значение скорости в широкой полосе частот на заданном интервале времени, используемое для оценки вибрационного состояния.

4 Общие принципы

4.1 Измеряемые величины и контролируемые параметры

Контролируемые параметры для оценки вибрационного состояния получают путем заданных преобразований сигнала вибрации в заданных точках и направлениях измерений при заданном режиме работы ветрогенератора. Выбор точек и направлений измерений может несколько отличаться от рекомендуемых настоящим стандартом, если доступ к ним ограничен из-за особенностей конструкции ветрогенератора и иных причин. Положение точек измерений, соответствующих требованиям настоящего стандарта, указывает изготовитель ветрогенератора.

Сигнал с преобразователя вибрации подвергается предварительной обработке, фильтрации и усреднению для получения в конечном итоге заданных контролируемых параметров.

Общие сведения по измерениям и формированию контролируемых параметров для оценки вибрационного состояния машин широкого класса, а также по применяемым для этого средствам измерений приведены в [16] и [20]. В отношении ветрогенераторов эти рекомендации должны быть дополнены

положениями других стандартов и руководств с целью формирования контролируемых параметров, отражающих специфику работы машин данного вида.

4.2 Параметры для оценки вибрационного состояния ветрогенератора

Условия, в которых приходится работать ветрогенератору, включая непрерывные изменения силы и направления ветра, приводят к постоянно изменяющейся вибрации и, как следствие, относительно быстрым изменениям и скачкам контролируемого параметра, которые могут быть весьма значительными. Только в редких случаях удается наблюдать длительные периоды стабильной работы ветрогенератора, которые для других машин являются обычным условием измерений в целях контроля вибрационного состояния.

Вследствие этого для получения контролируемых параметров вибрации ветрогенератора важно выполнять усреднение на значительном интервале, позволяющее компенсировать кратковременные флуктуации. Значения параметров, которые сравнивают с границами зоны состояния (см. приложение А), должны быть получены усреднением на заданном периоде времени.

Усреднение выполняют по энергетическим характеристикам вибрации — среднеквадратичным значениям корректированного ускорения и корректированной скорости на заданном интервале усреднения (см. 4.3). Параметрами, используемыми в целях контроля вибрационного состояния, будут соответственно контролируемое ускорение a_{w0} и контролируемая скорость v_{w0}. Коррекция исходного сигнала вибрации состоит в его прохождении через полосовой фильтр, определяющий диапазон частот измерений. Контролируемое ускорение a_{w0} вычисляют по формуле

$$a_{w0} = \sqrt{\frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} a_w^2(t)\,dt}, \quad (1)$$

где T_0 — период измерений (интервал усреднения);

$a_w(t)$ — корректированное ускорение как функция времени.

Диапазон частот измерений — в соответствии с разделом 5. Однако пользователь может выбрать другой диапазон, основываясь на своем опыте оценки вибрации.

Контролируемую скорость v_{w0} рассчитывают аналогичным образом.

Оценку вибрационного состояния осуществляют по значениям a_{w0} и v_{w0} совместно.

Примечание — Оценивание вибрационного состояния ветрогенераторов усреднением по возможным рабочим режимам сходно с оцениванием вибрационного воздействия на человека для оценки эффекта долговременного воздействия вибрации (см. [1]). Сама процедура усреднения эквивалентна выполняемой средством измерений, удовлетворяющим требованиям [4].

Вместе со значениями контролируемого ускорения (скорости) следует всегда указывать диапазон частот измерений и период измерений.

4.3 Период измерений

Период измерений T_0 зависит не только от характера и изменений ветра, воздействующего на ветроэнергетическую установку и ее элементы, но также и от оцениваемых параметров.

Для вибрации гондолы, мачты и их элементов, возбужденной силами аэродинамической природы в диапазоне от 0,1 до 10 Гц с относительно высокими значениями ускорения и скорости, период измерений рекомендуется выбирать равным 10 мин. Это позволит получить надежные измерения даже для узлов с вибрацией на частотах около 1 Гц и ниже (т. е. на частоте вращения турбины).

Для коробок передач и электрогенераторов область возбуждения вибрации, связанной с особенностями их конструкции, должна быть дополнена диапазоном от 10 до 1000 Гц и более. Если интерес представляют измерения только на этом высокочастотном участке спектра, то достаточно продолжительности измерений 1 мин.

Период измерений 10 мин может оказаться целесообразно разбить на несколько более коротких интервалов длительностью T_e в зависимости от применяемого средства измерений и условий работы ветрогенератора. Существенные изменения вибрации на этих интервалах времени могут привести к разбросу полученных среднеквадратичных значений a_{we}.

Измерение вибрации на любом интервале времени должно сопровождаться фиксацией скорости ветра, нагрузки и их изменений. Соответствующие данные можно получить после измерений от контроллера ветрогенератора.

Контролируемое ускорение a_{w0} рассчитывают по результатам измерений a_{we} на коротких интервалах времени по формуле

$$a_{w0} = \sqrt{\frac{1}{T_0}\sum_{e=1}^{n} a_{we}^2 T_e}, \quad (2)$$

где $T_0 = \sum_{e=1}^{n} T_e$.

5 Организация проведения измерений

5.1 Общие положения

В настоящем разделе рассматриваются измеряемые величины и их преобразования, а также точки и направления измерений на узлах ветрогенератора.

Измерения выполняют на подшипниковых опорах или иных элементах конструкции, вибрация которых является откликом на возбуждающие динамические силы и может быть использована для описания вибрационного состояния ветрогенератора в целом. Типичные точки измерений показаны на рисунках В.1 и В.2 приложения В. Если изготовитель предусмотрел в конструкции ветрогенератора места установки преобразователей вибрации, то их использование в качестве точек измерений является предпочтительным.

Хотя полная поступательная вибрация каждой точки может быть получена измерениями в трех взаимно перпендикулярных направлениях, в большинстве случаев в целях контроля вибрационного состояния столь детального описания не требуется. Число точек и направлений измерений вибрации может быть сокращено на основе опыта контроля вибрационного состояния ветрогенератора.

В процессе измерений должны быть определены параметры ускорения и скорости, сопровождаемые записями значений скорости ветра, нагрузки и их изменений.

5.2 Мачта и гондола

5.2.1 Вибрация гондолы и мачты, связанная с порывами ветра или возмущениями потока воздуха, и собственные колебания лопастей турбины и конструкции в целом (мачты и фундамента) с точки зрения временных и частотных характеристик не похожи на те, что наблюдают на других промышленных установках.

5.2.2 Характеристиками, определяющими вибрационное состояние, являются:

a) контролируемое ускорение, м/с^2;

b) контролируемая скорость, м/с.

Диапазон частот измерений для обоих параметров — от 0,1 до 10 Гц. Период измерений для обоих параметров — по 4.3.

Значение 0,1 Гц является типичной нижней границей диапазона частот измерений. Лишь в редких случаях частота вращения турбины будет ниже 0,1 Гц на интервале усреднения. Для таких ситуаций нижняя граница может быть уменьшена, чтобы включить в диапазон измерений частоту вращения ротора. Однако в любом случае коэффициент преобразования должен оставаться близким к постоянному значению во всем диапазоне частот измерений.

5.2.3 Типичные точки измерений находятся:

a) на раме гондолы вблизи опорного подшипника;

b) на мачте выше верхнего фланца;

c) на заднем конце рамы гондолы со стороны электрогенератора.

Примечание — Примеры расположения точек измерений на гондоле и мачте ветроэнергетической установки показаны на рисунках В.1 и В.2 приложения В.

5.2.4 Измерения проводят в направлениях:

a) осевом (вдоль оси ротора);

b) горизонтальном (перпендикулярно оси ротора);

c) вертикальном.

5.3 Подшипник ротора

5.3.1 Характеристиками, определяющими вибрационное состояние, являются:

a) контролируемое ускорение, м/с^2, в диапазоне частот от 0,1 до 10 Гц (в отношении нижней границы менее 0,1 Гц — см. 5.2.2);

b) контролируемая скорость, м/с, в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц.

Период измерений для обоих параметров — по 4.3.

5.3.2 Типичные точки измерений находятся:

a) на корпусе опорного подшипника в случае трехточечного крепления (см. рисунок В.1 приложения В);

b) на корпусах каждого подшипника в случае двух опорных подшипников (см. рисунок В.2 приложения В).

5.3.3 Измерения проводят в направлениях:

a) осевом (вдоль оси ротора);

b) горизонтальном (перпендикулярно оси ротора);

c) вертикальном.

5.4 Коробка передач

5.4.1 Характеристиками, определяющими вибрационное состояние, являются:

a) контролируемое ускорение, м/с^2, в двух диапазонах частот: от 0,1 до 10 Гц (в отношении нижней границы менее 0,1 Гц — см. 5.2.2) и от 10 до 2000 Гц;

b) контролируемая скорость, м/с, в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц.

Период измерений для обоих параметров — по 4.3.

5.4.2 Как в случае отдельно установленной коробки передач, так и в случае, когда подшипник ротора встроен в корпус коробки передач, типичные точки измерений находятся на корпусе вблизи входного и выходного валов.

Примечание — По возможности измерения проводят также в третьей плоскости посредине между двумя указанными точками измерений. Примеры выбора точек измерений на корпусе коробки передач показаны на рисунках В.1 и В.2 приложения В.

5.4.3 Измерения проводят в направлениях:

a) осевом (вдоль оси ротора);

b) горизонтальном (перпендикулярно оси ротора);

c) вертикальном.

5.5 Электрогенератор

5.5.1 Характеристиками, определяющими вибрационное состояние, являются:

a) контролируемое ускорение, м/с^2, в диапазоне частот от 10 до 5000 Гц;

b) контролируемая скорость, м/с, в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц.

Период измерений для обоих параметров — по 4.3.

5.5.2 Типичные точки измерений находятся:

a) если коробка передач и электрогенератор конструктивно объединены в один блок, то на корпусе в плоскостях подшипников входного вала и неприводного вала электрогенератора;

b) в случае гибкого соединения между коробкой передач и электрогенератором и жестком или податливом креплении электрогенератора — на корпусах обоих подшипников, как показано, например, в [21, рисунок 1].

Примечание — Примеры точек измерений на подшипниках электрогенератора показаны на рисунках В.1 и В.2 приложения В.

5.5.3 Измерения проводят в направлениях:

a) осевом (вдоль оси ротора);

b) горизонтальном (перпендикулярно оси ротора);

c) вертикальном.

5.6 Требования к средствам измерений

Контролируемые параметры вибрации определяют требования к средствам измерений, в состав которых обычно входят:

a) преобразователь вибрации;

b) усилитель сигнала;

c) полосовой фильтр, определяющий диапазон частот измерений;

d) процессор, преобразующий входной сигнал в его энергетическую характеристику (контролируемое ускорение или контролируемую скорость);

e) показывающее устройство и при необходимости устройство записи и хранения данных.

Средства измерений должны отвечать требованиям ИСО 2954 в отношении измерений в диапазоне частот с нижней границей 10 Гц. Аналогичные требования должны выполняться для измерений в диапазоне частот ниже 10 Гц, однако следует иметь в виду, что на очень низких частотах (порядка 0,1 Гц) возможности калибровки измерительной цепи ограничены.

При использовании акселерометра его частотный диапазон должен соответствовать диапазону измерений по 5.2—5.5 с коэффициентом преобразования, отличающимся от номинального на нижней границе диапазона частот, если она менее 10 Гц, не более чем на ± 3 дБ. При измерениях в диапазоне от 0,1 до 10 Гц лучшим выбором будет применение пьезорезистивного или емкостного акселерометра. Рекомендуется использовать акселерометры с малым временем восстановления после удара.

В настоящее время для измерений скорости в основном применяют пьезоэлектрические акселерометры, выходной сигнал которых подвергается интегрированию для преобразования в сигнал скорости. Такие преобразователи меньше по размерам, легче и менее чувствительны к ударам, чем электродинамические велосиметры, использовавшиеся в прошлом. Погрешности измерений могут быть связаны с пироэлектрическим эффектом и недостаточным временем установления при большой длительности интегрирования в низкочастотном диапазоне.

Пьезоэлектрические акселерометры со встроенной электроникой имеют ограничения по диапазону рабочих температур. На это следует обращать внимание, когда измерения необходимо выполнять в течение долгого времени в местах, подверженных нагреву, например, на корпусе коробки передач или подшипника.

Система контроля, с использованием которой осуществляется оценка вибрационного состояния, может работать в реальном масштабе времени или предоставлять данные для последующей обработки. Под работой в реальном масштабе времени здесь понимается использование измерительной системы, постоянно установленной на ветрогенераторе и осуществляющей непрерывные измерения и сбор данных для вычисления контролируемых параметров. Как правило, такие системы применяют для контроля технического состояния трансмиссии ветрогенератора. Если же система предполагает сбор данных с их последующей обработкой, то в этих целях измерения проводят на коротких интервалах времени, для чего часто используют портативные системы, управляемые оператором.

Применяемые измерительные системы должны соответствовать требованиям настоящего стандарта в отношении определяемых характеристик вибрации, точкам и направлениям измерений и рабочим условиям, чтобы обеспечить возможность сопоставления получаемых результатов с границами зон вибрационного состояния.

5.7 Крепление преобразователей вибрации

Крепление преобразователя внутри гондолы, требующее обеспечить передачу больших ускорений в широком диапазоне частот и, возможно, высоких температур, представляет собой сложную задачу. Неправильное крепление может привести к ошибкам измерений. Достоинства и недостатки разных способов установки преобразователей рассмотрены в [16, пункт 5.2]. Дополнительные сведения о креплении акселерометров приведены в [3].

Крепление преобразователя к конструкции должно быть жестким. Особенно это важно при измерениях высокочастотной вибрации. Если применяют вспомогательные средства крепления, то их жесткость также должна быть очень высока, чтобы резонансные колебания устройства крепления вместе с преобразователем не влияли на результат измерений. Может оказаться целесообразным проверить жесткость устройства крепления посредством испытаний на удар.

5.8 Условия работы во время измерений

Критерии оценки вибрационного состояния ветрогенератора и его узлов, приведенные в разделе 6, рассчитаны на измерения вибрации в нормальных условиях работы, т. е. при непрерывном производстве энергии на уровне не менее 20 % номинальной мощности (без обледенения поверхностей). Однако установленное руководство может быть полезным для контроля состояния во всем диапазоне возможных условий работы ветрогенератора.

В плановом режиме контроля через заданные интервалы времени не всегда необходимо определять значения всех контролируемых параметров в каждой точке измерений. Но если наблюдается рост

каких-либо контролируемых параметров в каких-либо условиях работы ветрогенератора, например, из-за возбуждения собственных колебаний, то следует выполнять весь комплекс измерений для этих условий с фиксацией параметров рабочего процесса (активной мощности, частоты вращения и пр.).

Допускается не проводить измерения в переходных режимах работы ветрогенератора (пуск, останов, изменение режима работы, нехарактерные удары или ориентации гондолы по ветру) или не учитывать результаты таких измерений при оценке вибрационного состояния.

6 Критерии оценки вибрационного состояния

6.1 Общие положения

В настоящем стандарте классификация вибрации ветрогенератора и его узлов осуществляется на основе двух критериев. Принципы построения этих критериев изложены в руководствах [2], [14] и [20]. Основой построения критериев является статистический анализ данных о значениях контролируемых параметрах узлов ветрогенератора, которые были собраны по достаточно большой выборке ветрогенераторов данного вида, продемонстрировавших надежное функционирование в течение длительного времени в условиях, описанных в 5.8.

Возможно, с появлением новых данных будет выявлена необходимость установления разных методов и критериев оценки в зависимости от конструкции и рабочих характеристик ветрогенератора, указанных в разделе 1, например:

a) номинальной выходной мощности;

b) типа и способа установки мачты;

c) типа и способа установки узлов ветрогенератора в гондоле;

d) конструкции ротора и числа лопастей;

e) типа подшипников ротора (отдельно стоящих или встроенных);

f) способа управления выходной мощностью (изменением положения или конструкцией лопастей турбины);

g) способа передачи электроэнергии в сеть (с использованием или без использования инвертора).

6.2 Границы зон вибрационного состояния

Первый критерий связан с абсолютными значениями контролируемых параметров разных узлов ветрогенератора, полученных по результатам измерений вибрации в заданных точках и направлениях в заданных условиях работы машины.

При оценке вибрационного состояния исследуемый узел относят к одной из четырех зон вибрационного состояния в зависимости от полученных значений контролируемых параметров (контролируемого ускорения и контролируемой скорости):

Зона A: В эту зону попадают, как правило, узлы нового ветрогенератора, только что введенного в эксплуатацию, при его работе в условиях постоянных нагрузок и низкой турбулентности воздушного потока;

Зона B: Узлы ветрогенератора, попадающие в эту зону, обычно считают пригодными для дальнейшего функционирования без ограничения сроков;

Зона C: Узлы ветрогенератора, попадающие в эту зону, обычно рассматривают как непригодные для длительной непрерывной эксплуатации. Рекомендуется выяснить, что именно послужило причиной повышенной вибрации и можно ли в данных обстоятельствах допустить долговременную работу ветрогенератора с учетом особенностей его конструкции и условий работы;

Зона D: Уровни вибрации в данной зоне обычно рассматривают как достаточно серьезные, для того чтобы вызвать повреждение узлов ветрогенератора.

Примечание 1 — Собранных данных пока недостаточно для установления границы между зонами A и B.

Числовые значения границ между зонами не предназначены для их использования при приемке ветрогенераторов. Условия приемки являются предметом соглашения между изготовителем ветрогенератора или его узлов и стороной, которая будет отвечать за эксплуатацию ветрогенератора.

Примечание 2 — Вместе с тем знание границ зон вибрационного состояния позволяет предотвратить как появление серьезных неисправностей ветрогенератора, так и установление чрезмерно завышенных и нереалистичных требований к производимой им вибрации. В отдельных случаях особенности конструкции ветрогенератора могут потребовать изменения значений границ зон (в большую или меньшую сторону).

При изменении границ зон относительно рекомендуемых значений изготовителю, как правило, следует объяснить причину этих изменений и при необходимости подтвердить, что ветрогенератор и его узлы могут нормально работать при повышенной вибрации.

6.3 Изменения контролируемых параметров

Второй критерий связан с изменением контролируемого параметра относительно некоторого ранее установленного значения. Значительные изменения параметра требуют принятия соответствующих мер. Такие изменения как плавного, так и скачкообразного характера могут свидетельствовать о существующем повреждении, развивающейся неисправности или некоторой другой аномалии в работе ветрогенератора.

Сравнению подлежат параметры, полученные в одной точке и направлении измерений при схожих условиях работы ветрогенератора. Следует выявить причину их существенных изменений, чтобы не допустить развития опасных ситуаций.

7 Данные, использованные для построения границ зон

Для построения границ зон вибрационного состояния были получены данные измерений с приблизительно 1000 ветрогенераторов. Эти данные, однако, нельзя считать достаточно представительными для формирования нормативных границ. В будущем предполагается уточнить границы зон по мере поступления новой информации.

Имеющиеся данные сведены в таблицу приложения А и могут быть полезны при обсуждении границ зон между изготовителями и пользователями ветрогенераторов, за которыми, однако, остается окончательное решение в отношении допустимых вибраций.

8 Установление предельных уровней вибрации

8.1 Общие положения

Существуют разные стандарты и руководства, дающие рекомендации в отношении установления предельных значений, превышение которых влечет за собой появление оповещений в виде соответствующих сигналов. Обычно применяют сигналы оповещения трех типов: УВЕДОМЛЕНИЕ, ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ. В настоящем стандарте подробно рассматриваются только два первых сигнала (использование оповещения ОСТАНОВ обычно нехарактерно для ветрогенераторов).

Примечание — Определение оповещений «уведомление» и «предупреждение» дано в [6].

Сигнал УВЕДОМЛЕНИЕ свидетельствует о достижения контролируемым параметром вибрации или его изменением уровня, после которого требуется применение некоторых корректирующих мероприятий. Обычно при этом допускается работа ветрогенератора без ограничений до тех пор, пока причины изменения вибрационного состояния не будут выявлены и не будут начаты соответствующие восстановительные работы.

Сигнал ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ свидетельствует о достижении вибрацией уровня, после которого дальнейшая работа ветрогенератора в нормальном режиме может привести к повреждениям мачты, гондолы, ротора или связанных с ним узлов.

8.2 Уровень УВЕДОМЛЕНИЯ

Уровень УВЕДОМЛЕНИЯ для разных ветрогенераторов может быть разным. Обычно его привязывают к базовым линиям контролируемого ускорения и контролируемой скорости в установившемся режиме работы ветрогенератора, которые определяют на основании опыта и результатов измерений вибрации в заданных точках и направлениях для данной машины.

В качестве общей рекомендации можно рассматривать задание уровня УВЕДОМЛЕНИЯ, превышающего базовую линию на 25 % значения границы между зонами В и С. Если уровень базовой линии низок, то уровень УВЕДОМЛЕНИЯ может быть ниже зоны С.

Если данные для определения базовой линии отсутствуют, например в случае приемки в эксплуатацию нового ветрогенератора, то уровень УВЕДОМЛЕНИЯ может быть согласован между заинтересованными сторонами, например с использованием опыта эксплуатации ветрогенераторов того же или схожего типа. Затем, после того как на основе наблюдений за работой ветрогенератора в течение

некоторого периода времени базовая линия будет определена, уровень УВЕДОМЛЕНИЯ следует соответствующим образом скорректировать.

Рекомендуется, чтобы уровень УВЕДОМЛЕНИЯ не превышал границу между зонами B и C более чем в 1,25 раз.

При изменении базовой линии (например, после ремонта с заменой узлов ветрогенератора) уровень УВЕДОМЛЕНИЯ следует пересмотреть.

Допускается устанавливать несколько уровней УВЕДОМЛЕНИЯ в зависимости от режимов работы ветрогенератора, для которых определяют контролируемые параметры.

8.3 Уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Целью установления уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ является защита ветрогенератора и его узлов от функциональных отказов, за которым может последовать небезопасная работа всей ветроэнергетической установки. Значения этих уровней определяются конструкцией ветрогенератора и его узлов, в частности, их способностью противостоять высоким динамическим нагрузкам. По этой причине обычно уровни ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ одинаковы для всех ветрогенераторов данной или схожей конструкции и не зависят от базовых линий, используемых при определении уровней УВЕДОМЛЕНИЯ. Ввиду зависимости от типа конструкции невозможно дать детальные рекомендации в отношении установления уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ по абсолютным значениям контролируемых параметров. Обычно этот уровень лежит в пределах зон C или D, но рекомендуется, чтобы он не превышал границу между этими зонами более чем в 1,25 раз.

8.4 Уровень ОСТАНОВА

Данный уровень в настоящем стандарте не рассматривается ввиду его сильной зависимости от типа ветрогенератора и ветровых условий. Однако для конкретного ветрогенератора уровень ОСТАНОВА может быть определен изготовителем.

Примечание — Сложность в определении уровня ОСТАНОВА состоит также в том, что по его смыслу превышение контролируемыми параметрами вибрации данного уровня требует немедленных действий, что плохо согласуется с относительно большим периодом измерений данных параметров.

9 Общие сведения о системах контроля состояния

9.1 Контроль широкополосной вибрации

Оценка вибрационного состояния, рассматриваемая в настоящем стандарте, может применяться в целях приемочных испытаний ветрогенераторов и его регулярного контроля в ходе эксплуатации. Для долговременного наблюдения за контролем технического состояния машины и ее диагностирования требуются более углубленные методы анализа, проводимого с использованием системы контроля состояния и выходящие за область применения настоящего стандарта. Принципы организации и работы систем контроля состояния ветрогенераторов рассматриваются в [9].

9.2 Системы контроля состояния ветрогенераторов

Система контроля состояния по параметрам вибрации ветроэнергетических установок обеспечивает раннее обнаружение неисправностей с помощью углубленных методов анализа и выбора контролируемых параметров и диагностических признаков, характерных для разного вида отказов узлов ветрогенератора.

Как правило, для каждой турбины определяются свои предельные значения с учетом начальных измерений (формирование базовой линии) и параметров рабочего процесса, влияющих на вибрацию. Важным элементом анализа является рассмотрение в частотной области составляющих на гармониках вращения и на частотах, характерных для дефектов разных узлов (зубцовых частотах, подшипниковых частотах).

Требования по применению систем контроля состояния рассмотрены в [18] и [19]. Дополнительная информация по данному вопросу содержится в [7]—[9].

Приложение А
(рекомендуемое)

Границы зон вибрационного состояния

В таблице А.1 приведены границы зон вибрационного состояния, полученные на основе статистического анализа данных, собранных с приблизительно 1000 горизонтально-осевых ветрогенераторов наземных ветроэнергетических установок с приводом электрогенератора через коробку передач. Данные были предоставлены изготовителями машин, страховыми обществами и сервисными компаниями. Данные относятся к ветрогенераторам мощностью не более 3 МВт, которые продемонстрировали надежную долговременную работу за время эксплуатации в условиях, описанных в 5.8. Таким образом, значения, указанные в таблице А.1, следует применять только к ветрогенераторам указанного вида.

Примечание — Предполагается, что после получения дополнительных данных таблица А.1 впоследствии может быть уточнена и распространена на установки мощностью свыше 3 МВт.

Приведенные в таблице А.1 границы зон вибрационного состояния применимы ко всем точкам и направлениям измерений, указанным в 5.2—5.5, в условиях работы ветрогенератора согласно 5.8. Для других точек и направлений измерений могут потребоваться другие значения границ.

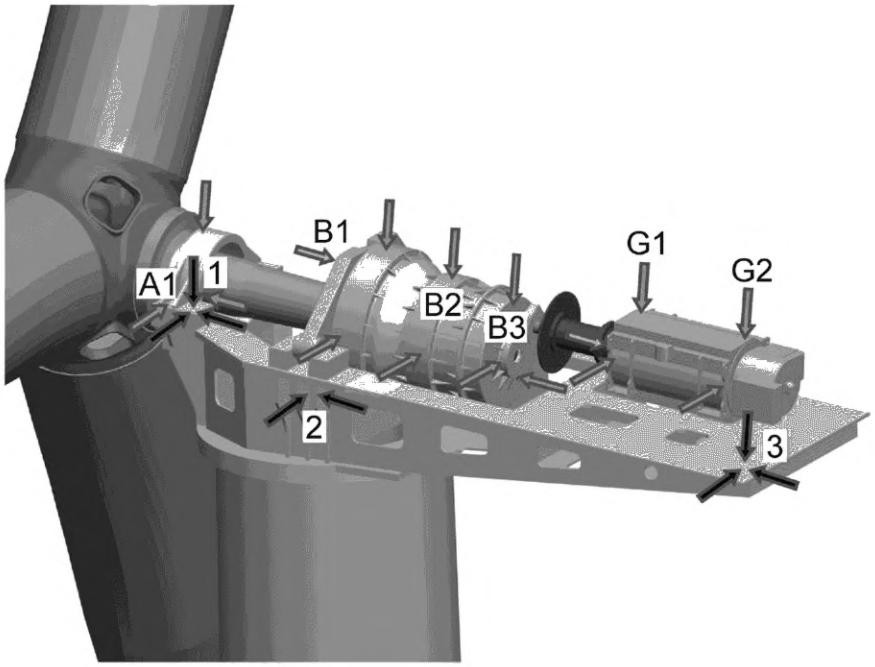
Таблица А.1 — Границы зон вибрационного состояния наземных установок мощностью не более 3 МВт

Элемент ветрогенератора	Контролируемое ускорение			Контролируемая скорость		
	Полоса частот, Гц	Граница зон B/C, м/с^2	Граница зон C/D, м/с^2	Полоса частот, Гц	Граница зон B/C, м/с	Граница зон C/D, м/с
Гондола и мачта	От 0,1 до 10	0,3	0,5	От 0,1 до 10	60	100
Подшипники качения ротора	От 0,1 до 10	0,3	0,5	От 10 до 1000	2,0	3,2
Подшипники качения коробки передач	От 0,1 до 10	0,3	0,5	От 10 до 1000	3,5	5,6
	От 10 до 2000	7,5	12			
Подшипники качения электрогенератора	От 10 до 5000	10	16	От 10 до 1000	6,0	10,0

Приложение В
(рекомендуемое)

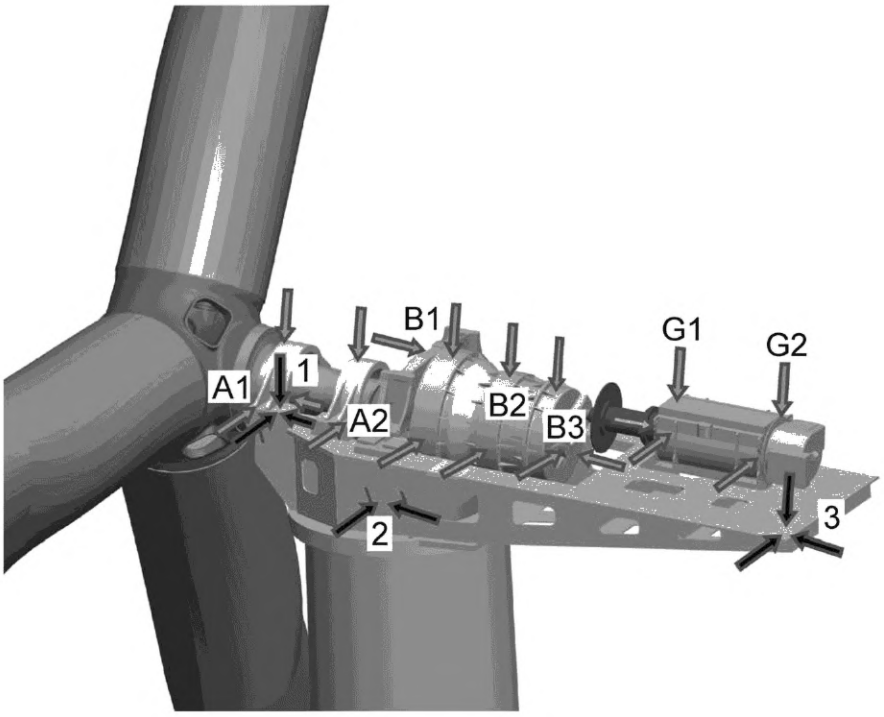
Две конструкции ветрогенератора с коробкой передач

На рисунках В.1 и В.2 схематично изображены конструкции двух типичных ветрогенераторов с указанием точек и направлений измерений вибрации (см. раздел 5).



A1 — точка и направления измерений на опорном подшипнике ротора; B1, B2, B3 — плоскости измерений на коробке передач; G1, G2 — плоскости измерений электрогенератора; 1 — точка и направления измерений на раме гондолы вблизи опорного подшипника ротора; 2 — точка и направления измерений над верхним фланцем мачты; 3 — точка и направления измерений на заднем конце рамы гондолы с неприводной стороны электрогенератора

Рисунок В.1 — Ветрогенератор с одним опорным подшипником



A1, A2 — точки и направления измерений на опорных подшипниках ротора; B1, B2, B3 — плоскости измерений на коробке передач; G1, G2 — плоскости измерений электрогенератора; 1 — точка и направления измерений на раме гондолы вблизи опорного подшипника ротора; 2 — точка и направления измерений над верхним фланцем мачты; 3 — точка и направления измерений на заднем конце рамы гондолы с неприводной стороны электрогенератора

Рисунок В.2 — Ветрогенератор с двумя опорными подшипниками

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным и межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального, межгосударственного стандарта
ISO 2041	IDT	ГОСТ Р ИСО 2041—2012 «Вибрация, удар и контроль технического состояния. Термины и определения»
ISO 2954	IDT	ГОСТ Р ИСО 2954—2014 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Требования к средствам измерений»

Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты.

Библиография

[1] ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements

[2] ISO 4866, Mechanical vibration and shock — Vibration of fixed structures — Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures

[3] ISO 5348, Mechanical vibration and shock — Mechanical mounting of accelerometers

[4] ISO 8041, Human response to vibration — Measuring instrumentation

[5] ISO 8579-2, Acceptance code for gears — Part 2: Determination of mechanical vibrations of gear units during acceptance testing

[6] ISO 13372, Condition monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary

[7] ISO 13373-1, Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1: General procedures

[8] ISO 13373-2, Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data

[9] ISO 16079 (all parts), Condition monitoring and diagnostics of wind turbines

[10] IEC 60034-14, Rotating electrical machines — Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher — Measurement, evaluation and limits of vibration severity

[11] IEC 60050-415, International Electrotechnical Vocabulary — Part 415: Wind turbine generator systems

[12] IEC 61400-4, Wind turbines — Part 4: Design requirements for wind turbine gearboxes

[13] IEC/TS 61400-13, Wind turbine generator systems — Part 13: Measurement of mechanical loads

[14] DIN 4150-3, Vibration in buildings — Part 3: Effects on structures

[15] VDI 3832, Measurement of structure-borne sound of rolling element bearing in machines and plants for evaluation of state condition

[16] VDI 3839 part 1:2001-03, Instructions on measuring and interpreting the vibrations of machines — General principles

[17] VDI 3839 part 2, Instructions on measuring and interpreting the vibrations of machines — Vibration patterns for excitation arising from unbalance, incorrect assembly, bearing faults and damage to rotating components

[18] Gellermann Th., & Walter G. Anforderungen an Condition-Monitoring-Systeme für Windenergieanlagen. Allianz-Zentrum für Technik, 2003

[19] Steingröver K., & Dalhoff P. Richtlinie für die Zertifizierung von Condition-Monitoring-Systemen für Windenergieanlagen. Germanischer Lloyd Industrial Services, 2013, Available at gost.e-ecolog.ru

[20] ISO 10816-1*, Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 1: General guidelines

[21] ISO 10816-3:2009**, Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ

* Заменен на ISO 20816-1 «Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 1: General guidelines».

** Заменен на ISO 20816-3 «Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 min^{-1} and 30 000 min^{-1}».

УДК 534.322.3.08:006.354 ОКС 17.160

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, ветрогенераторы, вибрация, измерения, контроль вибрационного состояния

Редактор *В.Н. Шмельков*
Технический редактор *И.Е.Черепкова*
Корректор *Р.А. Ментова*
Компьютерная верстка *Г.Р. Арифулина*

Сдано в набор 02.12.2021. Подписано в печать 11.01.2022. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,37.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru