

УДК 621.548 (075.8)

ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ НАГРУЗОК МАЛЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Имелбаев Фанис Фаритович

магистрант

Андрианова Людмила Прокопьевна

д-р техн. наук, профессор

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Аннотация. В работе приведены результаты анализа основных характеристик и применения нормативных методов определения проектных нагрузок при проектировании малых ветроэнергетических установок (МВЭУ). Проанализированы нагрузки, оказываемые воздействие на работу МВЭУ. Приведены методики и алгоритмы определения проектных нагрузок упрощённым методом, с помощью аэроупругого моделирования, и эквивалентных проектных напряжений с учетом парциальных коэффициентов безопасности для материала и нагрузок.

Ключевые слова: Малые ветроэнергетические установки, конструкция, проектные нагрузки, гравитационные и инерционные нагрузки, расчетное нагружение, упрощенный метод, аэроупругое моделирование, испытания на механическую прочность, парциальные коэффициенты безопасности.

REVIEW AND ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING PROJECT LOADS OF SMALL WIND POWER PLANTS

Imelbayev Fanis Faritovich

Andrianova Lyudmila Prokopyevna

Abstract. The paper presents the results of the analysis of the main characteristics and application of regulatory methods for determining design loads in the design of small wind power plants (MWEU). The loads exerted on the work of the MWEU are analyzed. Methods and algorithms for determining design loads by a simplified method, using aeroelastic modeling, and equivalent design stresses, taking into account partial safety coefficients for the material and loads, are given.

Key words: Small wind power plants, design, design loads, gravitational and inertial loads, calculated loading, simplified method, aeroelastic modeling, mechanical strength tests, partial safety coefficients.

Введение

К ветроэнергетическим установкам малой мощности (МВЭУ) относятся ВЭУ с ометаемой площадью менее 200 м², вырабатывающие мощность до 5 МВт.

При проектировании конструкции МВЭУ необходимо соблюдать требуемый уровень безопасности для обеспечения целостности конструкции и прочности ее несущих элементов в заданном диапазоне нагрузок. Для этого необходимо провести соответствующие расчеты или испытания предельной и усталостной прочности элементов конструкции МВЭУ [1, 2].

В статье представлен обзор и анализ нормативных моделей определения проектных нагрузок МВЭУ с помощью упрощённого метода, метода аэроупругого моделирования и метода испытания на механическую прочность [2].

1. Проектные нагрузки, воздействующие на МВЭУ

Проектные варианты нагружения, которые используются для проверки структурной целостности МВЭУ, рассчитывают на основе комбинирования [2, с. 21]:

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

При наличии взаимосвязи между экстремальными факторами внешней среды и ситуациями отказа комбинация этих двух событий рассматривается как реальный проектный вариант нагружения.

Каждая проектная ситуация требует рассмотрения нескольких вариантов расчетного нагружения. При проектировании МВЭУ согласно нормативной документации рассмотрению подлежат следующие проектные нагрузки (табл. 1).

Таблица 1

МВЭУ: Виды проектных нагрузок

Нагрузки	Причины возникновения
1. Гравитационные и инерционные нагрузки	Статические и динамические нагрузки, действующие на элементы конструкции МВЭУ и возникающие в результате вибрации, вращения, действия силы тяжести и сейсмической активности или движения опорной конструкции.
2. Аэродинамические нагрузки	Статические и динамические нагрузки, которые вызваны обтеканием воздушным потоком подвижных и неподвижных частей МВЭУ, в т. ч. башни и фундамента, и силовым взаимодействием воздушного потока с ними. Процесс обтекания воздушным потоком зависит от частоты вращения ветроколеса; средней скорости воздушного потока, протекающего через ометаемую площадь ветроколесом; турбулентности; плотности воздуха; аэродинамических профилей лопастей и их взаимодействия с воздушным потоком, включая аэроупругие эффекты.
3. Эксплуатационные нагрузки	Возникают при работе МВЭУ из-за изменения режима ветра, в процессе регулирования частоты вращения ветроколеса, во время пуска и останова ветроколеса, а также включения и выключения генератора и др.
4. Прочие виды нагрузок	Обусловлены особыми условиями эксплуатации МВЭУ. К ним относятся нагрузки от волн для МВЭУ, размещенных в море, нагрузки вследствие аэродинамического следа, ударные, ледовые нагрузки, возникающие при транспортировании, установке, монтаже, обслуживании и ремонте.
5. Нагрузки на конструкцию МВЭУ	При проектировании МВЭУ рассмотрению подлежат все наиболее важные проектные ситуации, которые возникают в процессе жизненного цикла МВЭУ.

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

2. Характеристика упрощенного метода расчета проектных нагрузок

Для расчета нагрузок МВЭУ упрощенным методом необходимы следующие проектные данные (табл. 2).

Таблица 2

Исходные проектные данные для расчета нагрузок

Параметр	Обозначение
Частота вращения ветроколеса	n_{design}
Скорость ветра	V_{design}
Крутящий момент	Q_{design}
Угловая скорость вращения	$\omega_{\text{yaw,max}}$
Максимальная частота вращения ветроколеса	n_{max}

Коэффициент быстроходности определяют по следующим формулам:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}, \quad 1)$$

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

$$\lambda = \frac{V_{\text{tip}}}{V_{\text{hub}}} = \frac{\omega R}{V_{\text{hub}}} \Rightarrow \lambda_{\text{design}} = \frac{R}{V_{\text{design}}} \frac{\pi n_{\text{design}}}{30}, \quad 2)$$

где V_{tip} – скорость ветра на конце лопасти, м/с;

V_{hub} – скорость набегающего воздушного потока на высоте оси ветроколеса;

R – радиус ветроколеса.

Крутящий момент ветроколеса Q определяют по формуле:

$$Q = \frac{P_r}{\omega_n} = \frac{P_r}{\eta \omega_n} = \frac{30P}{\eta \pi n}. \quad 3)$$

где P_r – мощность ветроколеса, Вт;

P – электрическая мощность, Вт.

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

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

Проектные ситуации, виды нагружения, режимы ветра и варианты расчёта нагрузок МВЭУ упрощённым методом представлены в табл. 3.

Таблица 3

Варианты расчетного нагружения МВЭУ упрощенным методом [2, с. 22]

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

Примечание: «У» относится к случаям усталостного нагружения и обозначает расчет на усталостную прочность. «П» относится к расчетам по предельным нагрузкам и связан с прочностными характеристиками материалов, деформациями, устойчивостью элементов конструкции.

Использование упрощённого метода определения проектных нагрузок возможно только для конфигурации МВЭУ с горизонтальной осью вращения. Для конфигураций МВЭУ при расчете проектных нагрузок применяется аэроупругое моделирование или проводятся испытания на механическую прочность путем измерения нагрузок.

3. Метод аэроупругого моделирования

В случаях, когда использование элементарных уравнений при проектировании невозможно, используют аэроупругое моделирование (табл. 4).

Таблица 4

Варианты проектных случаев нагрузки в аэроупругой модели [2, с. 27]

Проектная ситуация	Проектные случаи нагрузки (ПСН)	Режим ветра	Прочие условия	Вид расчёта
1. Выработка электроэнергии	1.1	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		У, П
	1.2	ЭКН $V_{hub} < V_{design}$		П
	1.3	ЭРП ₅₀ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ или $3V_{ave}$		П
	1.4	ЭИН ₅₀ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ или $3V_{ave}$		П
	1.5	ЭКП $V_{hub} = V_{design}$		П
2. Выработка электроэнергии в сочетании с отказом или потерей связи с электрической сетью	2.1	НПВ $V_{hub} = V_{design}$ или V_{out} или $2,5V_{ave}$	Отказ в системе управления	П
	2.2	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out} V_{B1}$	Неисправность системы контроля или защиты	У, П
	2.3	ЭРП ₁ $V_{in} < V_{out}$ или $2,5V_{ave}$	Отсоединение от электрической сети	П
3. Нормальный останов	3.1	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		У
	3.2	ЭРП $V_{hub} = V_{out}$ или $V_{max, shutdown}$		П

Продолжение таблицы 4

4. Аварийный останов или ручное выключение	4.1	МНТ должна быть определена производителем		П
5. Парковка (холостой ход)	5.1	МЭВ 50 - летний период повторяемости $V_{hub} = V_{e50}$	Отсоединение от электрической сети	П
	5.2	МНТ $V_{hub} = 0,7V_{ref}$		У
6. Парковка в сочетании с отказом	6.1	МЭВ период повторяемости один год $V_{hub} = V_{e1}$		П
7. Транспортирование, сборка, техническое обслуживание и ремонт	7.1	МНТ должна быть определена производителем		П
Примечание: «У» - усталостное нагружение и обозначает расчет на усталостную прочность. «П» - расчет по предельным нагрузкам и связан с прочностными характеристиками материалов, деформациями, устойчивостью элементов конструкции.				

Проведем анализ проектных случаев нагрузок (ПСН), указанных в табл. 4.

Анализ ПСН 1.1—1.5 МВЭУ при выработке электроэнергии

Данной проектной ситуации соответствует следующий режим: ветроколесо вращается, МВЭУ работает с подключенной электрической нагрузкой.

В расчетной схеме необходимо учитывать максимальный дисбаланс массы ветроколеса и аэродинамическую неуравновешенность, например, шаг лопастей и различие их углов поворота, указанные производителем.

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

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

ПСН 1.1 включает нагрузки, исходя из модели нормальной турбулентности (МНТ), которая сопровождает процесс нормальной эксплуатации МВЭУ в течение срока ее службы.

ПСН 1.2—1.5 относятся к переходным процессам, которые были отобраны как потенциально опасные ситуации, возникающие в процессе эксплуатации.

Анализ ПСН 2.1—2.3 МВЭУ при выработке электроэнергии в сочетании с отказами или потерей электрической сети

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

Для ПСН 2.1 возникновение отказа, связанного с выполнением функций управления или потерей связи с электрической сетью, рассматривается как нормальное событие.

Для ПСН 2.2 редкие события, как отказы реализации функций защиты или отказы во внутренних электрических цепях, рассматриваются как аварийные.

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

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

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

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

Анализ ПСН 3.1—3.2 МВЭУ при нормальном (контролируемом) останове

Данная проектная ситуация включает в себя все события, приводящие к нагружению МВЭУ в течение нормальных переходных процессов с момента окончания производства электроэнергии до заторможенного состояния (неподвижного) или состояния покоя (парковки). Число проектных случаев нагрузки основывается на особенности функционирования системы управления.

При отсутствии системы контроля остановов МВЭУ происходит ручным отключением, и усталостная нагрузка может быть проигнорирована.

Для ПСН 3.2 максимальная скорость ветра — V_{out} или $V_{max, shutdown}$.

Анализ ПСН 4.1 МВЭУ при аварийном останове или ручном отключении

При проектировании МВЭУ рассматривают нагрузки, возникающие в процессе аварийного останова или ручного отключения. В руководстве по техническому обслуживанию производитель ВЭУ указывает ограничения по максимальной рабочей скорости ветра.

Анализ ПСН 5.1—5.2 МВЭУ в состоянии парковки или при холостом ходе

Рабочее колесо запаркованной МВЭУ как при неподвижном положении, так и на холостом ходу оценивается при условиях экстремальной скорости ветра. Эти условия оцениваются как на основе модели экстремальной скорости ветра, так и на основе квазистатического анализа с соответствующими поправками для порывов и динамических реакций [2, 3]. Определяется ожидаемое количество часов простоя (отсутствия выработки энергии), когда под воздействием переменных нагрузок, вызываемых соответствующим воздействием ветра, например, от веса вращающихся вхолостую лопастей, может возникнуть существенное усталостное повреждение в каком-либо из элементов конструкции.

Рассматривается случай отключения МВЭУ на холостом ходу от электрической сети. Для МВЭУ, не имеющей связи с электрической сетью, потери в электрической сети не рассчитываются. В проектных нагрузках определяются вероятности повреждения компонентов МВЭУ при экстремальной скорости ветра.

Анализ ПСН 6.1 МВЭУ в состоянии парковки в сочетании с ситуацией отказа

Рассмотрению подлежат отклонения от нормального поведения запаркованной МВЭУ, обусловленные отказами электрической сети или МВЭУ. Если какой-либо отказ в сети подключения, исключая ситуацию отключения от сети, вызывает отклонения от нормального поведения МВЭУ в состоянии парковки, то возможные последствия являются предметом анализа. Состояния отказа рассматриваются для периода повторяемости максимального экстремального ветра (МЭВ) в один год. Режимы ветра МЭВ соответствуют

турбулентной модели или квазистатической с соответствующими поправками на порывы и динамические характеристики.

Анализ ПСН 7.1 МВЭУ при транспортировании, сборке, техническом обслуживании и ремонте

Производитель указывает все климатические параметры и проектные ситуации, допустимые при транспортировании, сборке, техническом обслуживании и ремонте МВЭУ. В соответствии с этим рассматриваются следующие нагрузки:

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

Для каждого проектного случая, описанного в табл. 4, определяют соответствующие нагрузки, учитывая следующие факторы:

- возмущения поля скоростей ветра, вызванные работой самой МВЭУ, такие как аэродинамический след, затенение башней и пр.;
- влияние пространственного потока на аэродинамические характеристики лопасти, например, трехмерный срыв потока и аэродинамические концевые потери;
- нестационарные аэродинамические процессы;
- динамику конструкции и ее собственные колебания;
- аэроупругие эффекты;
- особенности функционирования системы защиты и управления МВЭУ.

Для всех компонентов МВЭУ рассчитываются проектные напряжения в соответствии с проектными нагрузками для каждой силы и момента, на базе которых определяются результирующие эквивалентные напряжения.

Математические модели для вычисления эквивалентных напряжений приведены в табл. 5.

Таблица 5

Эквивалентные нагрузки [2, с. 29]

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

Результирующие эквивалентные напряжения сравнивают с проектными значениями для материалов.

Аэроупругое моделирование используется для определения нагрузок, возникающих под воздействием ветра в заданном диапазоне скоростей и для учёта турбулентности воздушного потока и прочих характеристик ветра, игнорирование которых может привести к опасному нагружению конструкции МВЭУ.

4. Испытания на механическую прочность

Предельная прочность материала устанавливается при 95 % вероятности выживания с уровнем доверительной вероятности 95 %. [2, с. 29].

При определении прочностных свойств материала компонента МВЭУ следует учитывать:

- натурное испытание материала;
- соответствие свойств материала элемента конструкции свойствам материала, полученным в результате испытаний опытных образцов;
- испытания статичных, усталостных и других нагрузок;
- эффекты внешней среды (например, коррозия, воздействие ультрафиолетовых лучей, влажность, температура и т. д.);
- влияние геометрических характеристик расчетных сечений на свойства материала (например, распределение материала по форме лопастей, наличие

уплотнений в строительных смесях и деревянных элементах, распределение металла при ковке и т. д.).

Полная характеристика прочностных свойств материала определяется с учетом пяти вышеперечисленных условий. Минимальная характеристика прочностных свойств материала выявляется только на основе испытаний.

Парциальные коэффициенты безопасности для материала компонента МВЭУ указаны в табл. 6.

Таблица 6
Парциальные коэффициенты безопасности для материала [2, с. 30]

Вид нагрузки	Полная характеристика	Минимальная характеристика
Усталостная	1,25*	10,0**
Предельной прочности	1,1	3,0
Примечание: * - показатель, учитываемый при расчете повреждений; ** - показатель, принимаемый при измерении предельных нагрузок материалов.		

Парциальные коэффициенты безопасности для усталостных нагрузок и для нагрузок предельной прочности указаны в табл. 7.

Таблица 7
Парциальные коэффициенты безопасности для нагрузок [2, с. 30]

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

Для обеспечения надежных значений проектных величин учитывают парциальные коэффициенты безопасности по нагрузкам и материалам в соответствии с требованием:

$$\sigma_d \leq \frac{f_k}{\gamma_m \gamma_f}, \quad 4)$$

где f_k – нормативная величина прочности материала;

γ_m – парциальный коэффициент безопасности для материала;

γ_f – парциальный коэффициент безопасности по нагрузкам.

Расчёты на усталостную прочность проводятся по методике Майнера [2, с. 30].

В соответствии с данной методикой предельное состояние считается достигнутым, когда накопленное повреждение превысит 1. В данном случае повреждение, накопленное за проектный срок службы МВЭУ, должно быть меньше или равно 1, определяемое по формуле:

$$\text{Damage} = \sum_i \frac{n_i}{N(\gamma_f \gamma_m S_i)} \leq 1,0, \quad 5)$$

где n_i – подсчитанное число усталостных циклов в / выборке нагрузки;

S_i – уровень напряжения (деформации), зависящий от подсчитанного числа циклов в / выборке;

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

$\gamma_f \gamma_m$ – парциальный коэффициент безопасности по нагрузкам и для материала соответственно.

Выводы:

1. Упрощённый метод определения проектных нагрузок применяется для МВЭУ с горизонтальной осью вращения при наличии двух и более консольных лопастей и жесткой втулки.

2. Метод аэроупругого моделирования (модель динамической прочности), используется для определения нагрузок, возникающих под воздействием ветра в заданном диапазоне скоростей.

3. Метод испытаний на механическую прочность применяется для проведения полномасштабных испытаний нагрузок в сочетании с экстраполяцией измеренных значений.

Определение проектных нагрузок на МВЭУ направлено на подтверждение конструктивной целостности МВЭУ и обеспечение заданного уровня надежности и требуемого уровня безопасности ветроэнергетической установки.

Список литературы

1. ГОСТ Р 54418.1 — 2012 Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования: Изд-во Москва, Стандартинформ, 2016, - 82 с.

2. ГОСТ Р 54418.2 – 2014 Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 2. Технические требования к малым

ветроэнергетическим установкам: Изд-во Москва, Стандартиформ, 2015, - 65 с.

3. ГОСТ Р 51990 – 2002 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация: Изд-во Москва, Госстандарт России, 2003, - 8 с.

© Ф.Ф. Имелбаев, Л.П. Андрианова, 2022.