

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ ГОЛОВНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ БАШЕН ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Рассматриваются вопросы создания информационно-измерительной системы для экспериментальных исследований, испытаний, технической диагностики и мониторинга головных образцов опорных металлических башен ветроэлектрических установок (ВЭУ) большой единичной мощности. В качестве аналога приведен разработанный автором проект оснащения оболочечной опорной башни высотой 30 м для ВЭУ с ветровой турбиной (ветрогенератором) мощностью 1250 кВт и вертикальной осью вращения.

The problems are considered concerning creation of information-measuring system for experimental research, testing, technical diagnostics and monitoring of prototypes of bearing metal towers for wind power plants (WPP) of large capacity. As an analogue developed by the author the design of equipment for supporting shell tower with a height of 30m for WPP with a wind turbine (wind-powered generator) of 1250 kW capacity and a vertical rotation axis is submitted.

Ключевые слова: ветроэлектрические установки, опорная башня, информационно-измерительная система.

Ветроэлектрические установки с вертикальной осью вращения ветрогенератора по многим показателям являются наиболее перспективными для создания массовых ветроагрегатов, необходимых для удовлетворения потребности регионов в возобновляемых источниках энергии.

Металлическая опорная башня ВЭУ предназначена для монтажа и размещения в рабочем положении ветровой турбины, восприятия и передачи массовых и аэродинамических нагрузок от ветровой турбины и силового оборудования, а также для размещения опорно-трансмиссионной системы и электрического оборудования. Наиболее эффективными по металлоемкости и другим показателям являются опорные башни оболочечной листовой конструкции.

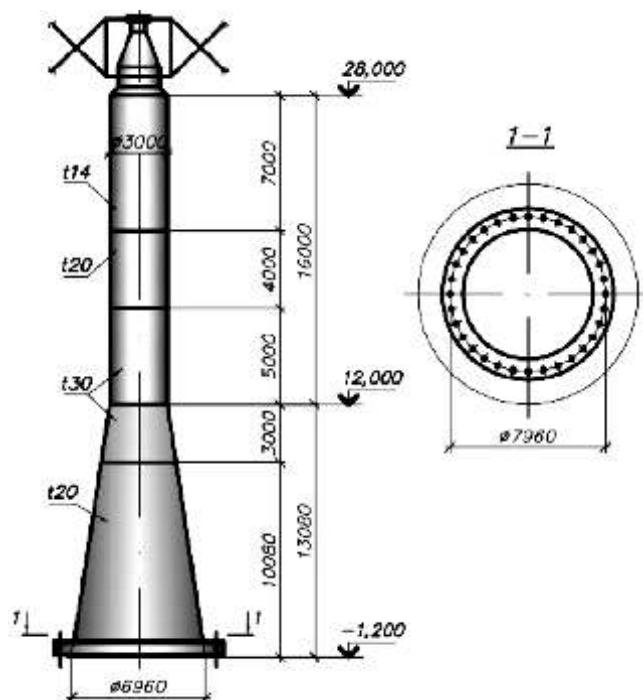


Рис. 1. Конструктивная схема опорной башни ВЭУ



З.А. Шульман
технический директор
корпорации «Промстальконструкция»,
к.т.н., г. Днепропетровск

Рассматриваемая опорная башня представляет собой комбинированную оболочечную конструкцию, состоящую из нижней конической оболочки и соосной с ней верхней цилиндрической оболочки. Толщина оболочки от 14 до 30 мм (рис. 1). С помощью опорного фланца башня опирается на фундамент и крепится к нему 32 анкерными болтами М90. На верхнем торце башни предусмотрен фланец для опирания и закрепления ветровой турбины. В нижней части башни выполнен проем 2,5×2,5 м для монтажа и обслуживания оборудования. Внутри башни предусмотрены опорные конструкции для генератора и мультипликатора, площадки для обслуживания оборудования и лестницы-стремянки.

Эксплуатационная надежность опорной башни определяется следующими факторами: выбором конструктивной схемы; назначением марки стали и уровня допускаемых напряжений; расчетом на прочность, устойчивость и выносливость, учитывающим все действующие нагрузки и воздействия и их возможные сочетания; назначением жесткости конструкции, при которой исключается возможность возникновения резонанса; контролем напряженного состояния и динамических характеристик башни в процессе эксплуатации.

Основные расчетные параметры башни: высота 28 м; вес металлоконструкций 76 т; частота первого тона свободных колебаний 2,52 Гц.

Специфические данные силовых динамических нагрузок:

1. Изменение нагрузки в цикле – синусоидальное. Минимальная нагрузка в цикле составляет 5 кН от максимальной.

2. Приведенные нагрузки не учитывают инерционных сил, вызванных колебаниями башни.

3. Повторяемость различных уровней силовых факторов принята по таблице 1.

Таблица 1

Уровень	0,7А _{макс}	0,8А _{макс}	0,9А _{макс}	А _{макс}
Повторяемость	$96 \cdot 10^6$	$66 \cdot 10^6$	$27 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$

Проект оснащения башни информационно-измерительной системой (ИИС) выполняется в составе рабочей документации на строительство опорной части ВЭУ (стадия КМ) на базе действующей в Украине нормативно-технической и методической документации и включает следующие разделы:

- программу натуральных испытаний и диагностики головного образца опорной башни ВЭУ;
- систему контрольно-диагностических измерений и мониторинга технического состояния металлоконструкций опорной части ВЭУ.

Ниже приведены основные положения программы и технические решения по оснащению ВЭУ контрольно-измерительной аппаратурой для создания ИИС.

Программа натуральных испытаний. Цель натуральных испытаний (далее испытаний) ВЭУ – получение экспериментальной информации о динамическом поведении строительных опорных конструкций (опорная башня и фундамент) при различных режимах работы ветроагрегата для подтверждения и уточнения предпосылок, определяющих характеристики системы диагностики.

По результатам испытаний ставится задача получить:

- общие характеристики процессов вибрации при различных (переходных и установившихся) режимах работы ВЭУ, необходимых для классификации процессов;
- частотный состав процессов вибрации;
- статистические характеристики процессов в диапазоне частот 0,3–70 Гц;

- две-три модальные частоты опорной башни;
- диапазон изменения напряжений в характерном сечении опорной башни при различных режимах работы ВЭУ;
- логарифмические декременты колебаний.

Для экспериментального определения собственных частот и декрементов двух-трех первых форм колебаний ВЭУ планируется проведение двух серий экспериментов.

Первая серия экспериментов состоит в измерении колебаний конструкции ВЭУ в ветровом потоке с отключенными энергетическими агрегатами. Ожидаемый результат – спектр частот двух-трех первых форм собственных колебаний (модальных частот) и оценка логарифмических декрементов колебаний.

Во *второй серии* измеряются колебания ВЭУ при кинематическом возбуждении. Метод возбуждения колебаний – разрыв калиброванного образца, закрепленного в точках, определенных расчетом.

Принципиальная схема возбуждения колебаний приведена на рис. 2.

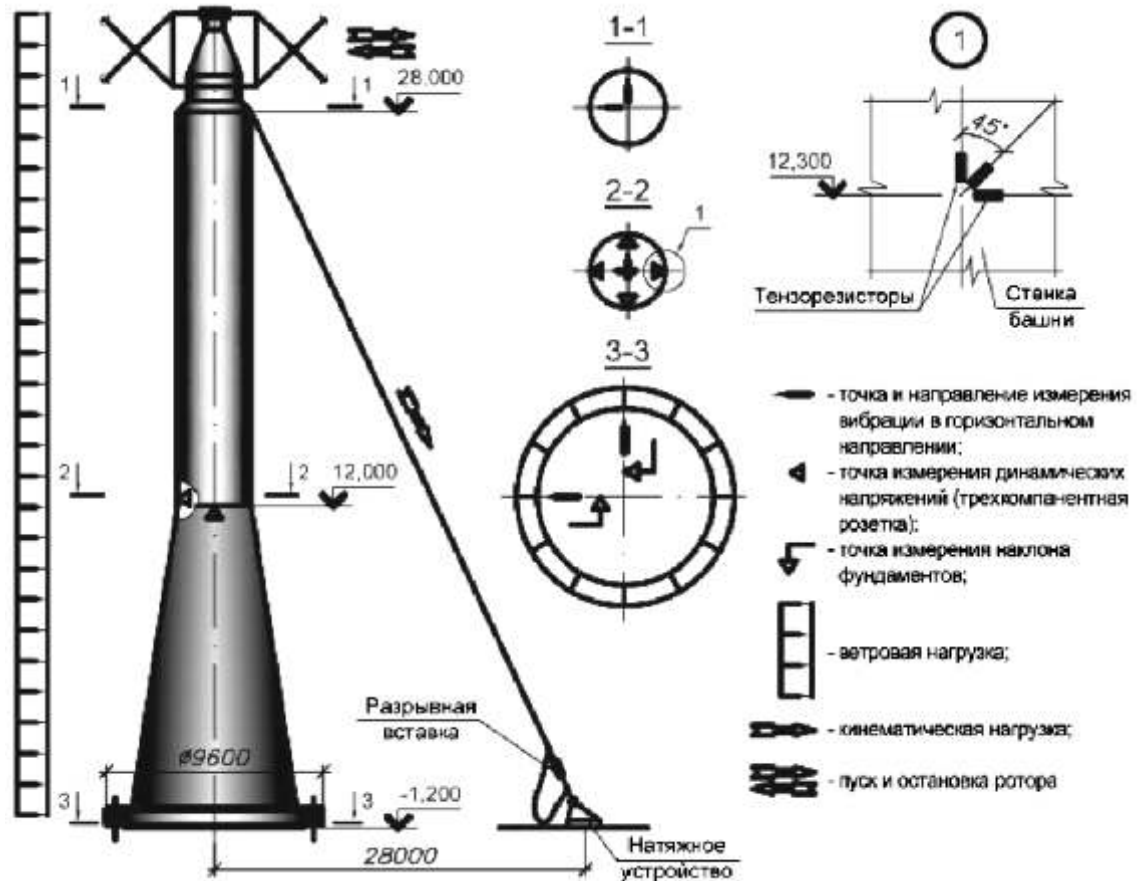
В результате эксперимента ожидается получение двух первых модальных частот и соответствующих уточненных значений модульных затуханий.

Следующая (третья) серия экспериментов имеет целью определение динамических параметров строительных конструкций башни в переходных (пуск, остановка) и установившихся рабочих режимах работы ВЭУ.

В этих экспериментах ожидается получение информации о спектре частот и распределении энергии по частотам колебаний, возникающих в опорной конструкции и фундаментах при различных режимах работы ветроагрегата, уровне динамических напряжений в отдельных узлах и элементах опорной части ВЭУ, общих характеристиках процессов вибрации.

Четвертая серия экспериментов проводится при установившемся режиме работы ветроагрегата. Задача этой серии экспериментов – изучение поведения сооружения при различных скоростях вращения ротора.

Получение информации по результатам измерений третьей и четвертой серий экспериментов осуществляется путем накопления статистических данных о напряженно-деформированном состоянии металлоконструкций башни и динамических параметрах ее работы.



Режим работы ВЗУ	Вид воздействия	Измеряемые величины	Кол-во первичных преобразователей	Тип регистратора	Продолжительность цикла измерений, мин	Кол-во циклов измерений	Способ регистрации
I серия экспериментов							
Нерабочий	Ветровое	1. Параметры ветрового воздействия	2	Анеморумбометр	30	15	Аналоговый, дискретный
		2. Параметры колебаний опорной башни	6	Вибродатчик	30		Аналоговый
		3. Фибровые напряжения в сечении опорной башни	12	Тензорезистор	5		Дискретный
II серия экспериментов							
Нерабочий	Кинематическое	1. Параметры колебаний опорной башни	6	Вибродатчик	До затухания колебаний от кинематического воздействия	6	Аналоговый
		2. Фибровые напряжения в сечении опорной башни	12	Тензорезистор			Дискретный
III серия экспериментов							
Переходный	Пуск, Остановка	1. Параметры ветрового воздействия	1	Анеморумбометр	От пуска до выхода на установленный рабочий режим	5	Аналоговый
		2. Параметры колебаний опорной башни	6	Вибродатчик			
		3. Фибровые напряжения в сечении опорной башни	12	Тензорезистор	От начала торможения до полной остановки		Дискретный
IV серия экспериментов							
Рабочий (установочный)	Ветровое и от вращения ротора	1. Параметры ветрового воздействия	1	Анеморумбометр	15	до 10	Аналоговый, дискретный
		2. Параметры колебаний опорной башни	6	Вибродатчик			Аналоговый
		3. Фибровые напряжения в сечении опорной башни	12	Тензорезистор			Дискретный

Рис. 2. Программа проведения экспериментальных работ

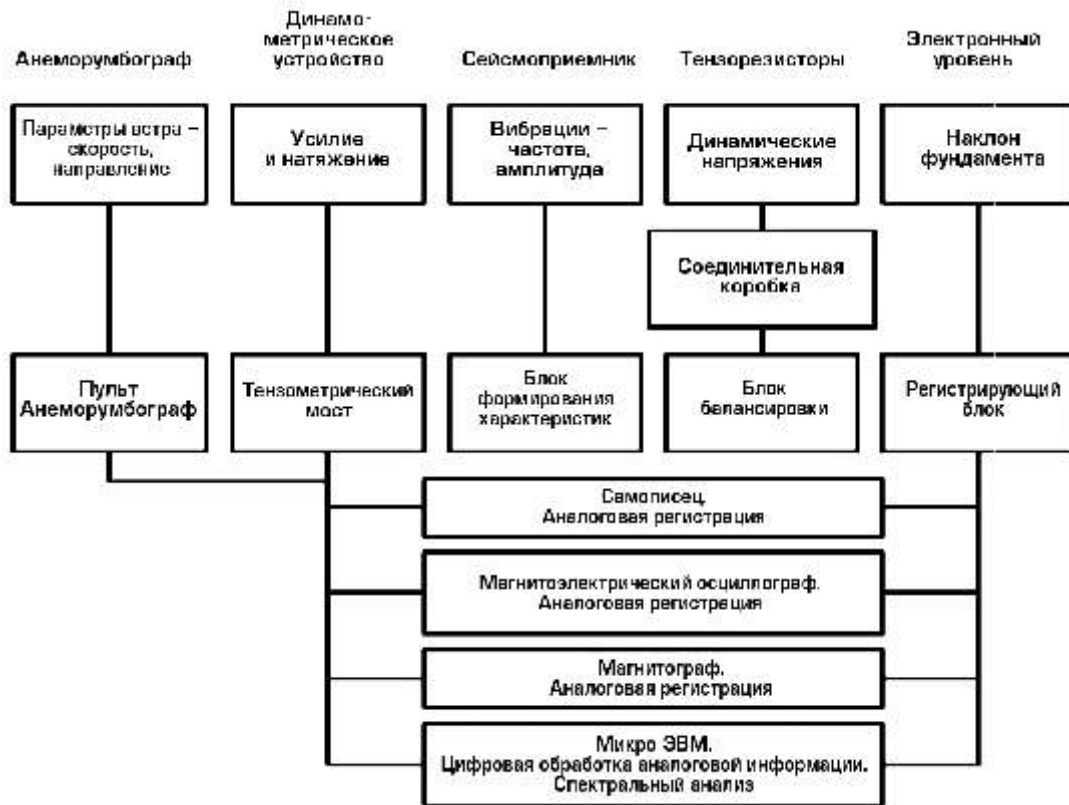


Рис. 3. Структурная схема измерений при проведении испытаний

Схемы и характер приложения нагрузок и воздействий, расположение точек измерений и продолжительность регистрации исследуемых процессов приведены на рис. 2. Структурная схема измерений приведена на рис. 3.

Техническая диагностика. Общие критерии построения системы. Система диагностического контроля и диагностики (далее система диагностики) технического состояния опорных строительных конструкций ВЭУ (опорная башня и фундамент) предназначена для выявления возможных повреждений конструкций в процессе эксплуатации и накопления статистических данных об изменении напряженного состояния и параметров колебаний опорной башни с целью предотвращения серьезных повреждений конструкций и оценки ее усталостного ресурса.

Исходя из расчетно-теоретических предпосылок и результатов испытаний в качестве информативных параметров, характеризующих состояние опорных строительных конструкций, определяются: динамические напряжения в опорной башне; вибрация опорной башни; вибрация фундамента; осадка и крен фундамента.

Значения информативных параметров определяются в точках сбора информации (ТСИ), представленных на рис. 4. Количество ТСИ назначается из условия минимальной достаточности для контроля за состоянием конструкций.

На фундаменте и опорной башне количество ТСИ выбирается в предположении идентичности характера их колебаний и уточняется по результатам испытаний ВЭУ. ТСИ располагаются в местах ожидаемых наибольших значений информативных параметров в двух ортогональных плоскостях, одна из которых ориентируется по преимущественному направлению розы ветров района строительства ВЭУ.

При выборе разрешающей способности датчиков и диапазона измерений, периодичности, длительности и одновременности опроса датчиков в качестве исходных для системы диагностики принимаются следующие предпосылки:

- Вибрации строительных конструкций при установившемся режиме работы ВЭУ обладают свойствами стационарности.
- Наличие корреляционной зависимости между вибрацией опорных строительных конструкций и внешними воздействиями.

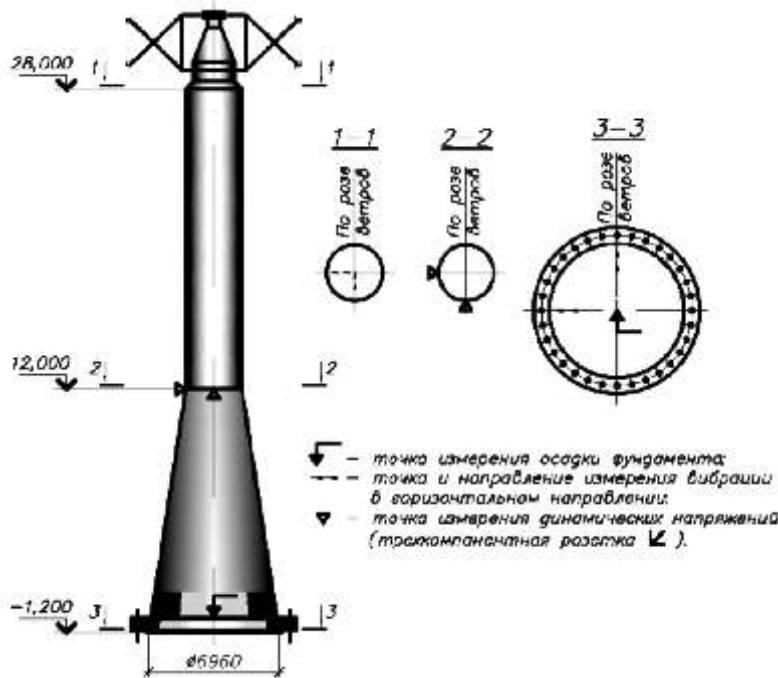


Рис. 4. Дислокация мест сбора информации при технической диагностике ВЭУ

- Напряжения в конструкции башни не превышают $R_y = 220$ МПа.
- Состояние конструкций определяется частотами, которые находятся в диапазоне:
 - от воздействий вращающегося ротора $f_1 = 0,2-1,8$ Гц;
 - собственных колебаний опорной башни по первой форме $f_2 = 2,5$ Гц.
- Диапазон анализируемых частот составляет примерно 200 % диапазона частот, определяющих динамическое состояние ВЭУ – 0,2–5 Гц.
- Логарифмический декремент колебаний опорной башни принят равным 0,05 на основе опытных данных.
- Ожидаемые максимальные перемещения не превышают определенных расчетом значений – 100 мм.
- Нормированная среднеквадратичная ошибка оценки спектральной плотности 0,2.
- По степени ответственности, определяемой размером материального и социального ущерба, возможного при достижении конструкциями предельных состояний, в соответствии с «Правилами учета степени ответственности зданий и сооружений при проектировании конструкций» опытный образец ВЭУ может быть отнесен ко II или III классу.

- Расчетным для опорных строительных конструкций является нерабочее состояние ВЭУ при буревом ветре.

Некоторые из предпосылок обычно нуждаются в подтверждении либо уточнении, которые могут быть получены в результате испытания ВЭУ.

С учетом двух последних предпосылок сбор информации осуществляется периодически.

При сборе информации в соответствии с [1, 2, 3] продолжительность опроса датчиков принята равной: для контроля напряженного состояния в течение 3-х наибольших ожидаемых периодов – 6 с; для оценки усталостного ресурса в течение 500 наибольших ожидаемых периодов – 950 с.

Частота опроса в обоих случаях должна быть в 5–10 раз выше наибольшей учитываемой частоты и составлять $10 \times 5 = 50$ Гц.

Технические характеристики информативных параметров системы диагностики приведены в таблице 2.

Методы обработки и анализа исходной информации. Динамические напряжения. В каждой точке измерений собирается информация об относительной деформации конструкций опорной башни в кольцевом (x), меридиональном (y) и под углом 45° к первым двум направлениям (45).

Для диагностического контроля по известным зависимостям вычисляются значения нормальных кольцевых и меридиональных (x, y), главных (μ_{max}), приведенных ($\mu_{пр}$) и касательных (μ_{max}^{min}) напряжений

$$\mu_{\max}^{\min} = \frac{E}{2} \frac{x + y}{1 - \mu} \pm \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(x + y)^2 + [2 \mu_{45} - (x + y)]^2};$$

$$\mu_{\max} = \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{2};$$

$$x = \frac{E}{1 - \mu^2} (\mu_{x + \mu y}); \quad y = \frac{E}{1 - \mu^2} (\mu_{y + \mu x});$$

$$\mu_{пр} = \sqrt{\mu_{\max}^2 - \mu_{\max} \mu_{\min} + \mu_{\min}^2},$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости.

Таблица 2

Технические характеристики информативных параметров системы диагностики

Наименование информативного параметра	Динамические напряжения в опорном сечении башни (отм. 15.000)	Вибрация верха опорной башни (отм. 28.000)	Вибрация фундамента (отм. 0.000)	Осадка фундамента (отм. 0.000)
Измеряемая величина	Относительные деформации на базе 20 мм	Виброперемещение или виброскорость	Виброперемещение	Перемещения
Диапазон измерений:				
Амплитуда, мм	10^{-3} е.о.д.	1–100	0,05–5	1–100
Частота, Гц	0–5	0,2–5	0,2–5	–
Чувствительность, мм	10^{-5} е.о.д.	1 (0,3)	0,05	1
Частота опроса датчиков, Гц	30–50	30	30	–
Продолжительность опроса (регистрации), с	6/1000	600	600	–
Периодичность опроса (регистрации)	Через каждые 6 час при каждом пуске и остановке	По запросу оператора	По запросу оператора	1 раз в сутки
Количество синхронно опрашиваемых датчиков, шт	6/2	2	4	4
Одновременно регистрируемые параметры	Наработка до момента опроса. Количество пусков и остановок ВЭУ	Параметры ветра, температура воздуха, наличие гололеда	Параметры ветра, температура воздуха, наличие гололеда	

Значения напряжений приводятся за три периода колебаний ВЭУ и характеризуют изменение напряженного состояния опорной башни с момента эксплуатации («нулевое» состояние – нерабочее состояние ВЭУ) и сравниваются с соответствующими пороговыми значениями, полученными теоретическим или экспериментальным (при испытании ВЭУ) методами.

При превышении вычисленного по данным измерений одного из компонентов напряженного состояния порогового значения агрегат отключается оператором.

Количество отсчетов по шести каналам одного цикла измерений – 1800.

Для оценки усталостного ресурса конструкции опорной башни собирается информация в каждой точке измерений о деформациях в меридиональном направлении (ϵ_y).

Обработка выполняется по методике, изложенной в [3], с использованием схематизации по методу «дождя». Результатом являются статистические характеристики процесса: распределение частот повторений $h(\epsilon_y)$ и накопленных частот повторений $H(\epsilon_y)$; эмпирическая функция распределения $F_0(\epsilon_y)$.

Количество отсчетов по двум каналам за один цикл измерений – 95000.

Вибрация опорной башни и фундамента. По данным цикла измерений в каждой точке виброперемещений или виброскоростей $[x(t)]$ вычисляются следующие статистические характеристики:

- квадрат среднего значения – μ^2 , где

$$\mu = \lim_T \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt;$$

- средний квадрат

$$^2 = \lim_T \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt;$$

- дисперсия

$$^2 = \lim_T \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu]^2 dt;$$

- функция спектральной плотности

$$G_{xx} = \frac{2}{T} |x(f)|^2,$$

где $x(f)$ – финитное преобразование Фурье функции $x(t)$,

$$x(f) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt.$$

Здесь f – частота; j – мнимая единица; T – длительность реализации.

Вышеназванные характеристики позволяют оценивать общую энергию вибрации, статическую и динамическую составляющие процесса вибрации и распределение энергии по частотам.

Пороговые значения характеристик назначаются по результатам испытания ВЭУ. При отклонении фактических значений от пороговых больше допустимой величины агрегат отключается оператором.

Количество отсчетов по шести каналам при одном цикле измерений 71000.

Осадка и крен фундамента. По данным измерения перемещений фундамента в трех точках относительно несмещаемой точки вне фундамента (репера) вычисляется осадка y_i^t и крен фундамента t_1^t и t_2^t в двух ортогональных направлениях:

$$y_{\Phi}^t = \frac{y_1^t l_2 + y_2^t l_1}{l_2 + l_1};$$

$$t_1^t = \arctg \frac{y_1^t - y_2^t}{l_2 + l_1};$$

$$t_2^t = \arctg \frac{y_3^t(l_2 + l_1) - y_1^t l_2 - y_2^t l_1}{l_3(l_2 + l_1)},$$

где y_i^t – перемещения точки i ($i = 1, 2, 3$) фундамента в момент времени t

$$y_i^t = y_p^t - y_p^o + y_i^t - y_i^o,$$

y_p^t, y_p^o – отчеты по приборам, установленным на репере, в момент времени t и в начальный момент (до пуска ВЭУ в эксплуатацию); y_i^t, y_i^o – то же, в точке i фундамента; l_i – расстояние от точки измерения i до центра фундамента.

Схема функционирования системы диагностики опорной башни. Работа системы диагностирования реализуется функциональной схемой, представленной на рис. 5.

Датчики контроля, установленные согласно схеме, осуществляют преобразование параметров работы конструкций опорной башни (вибра-

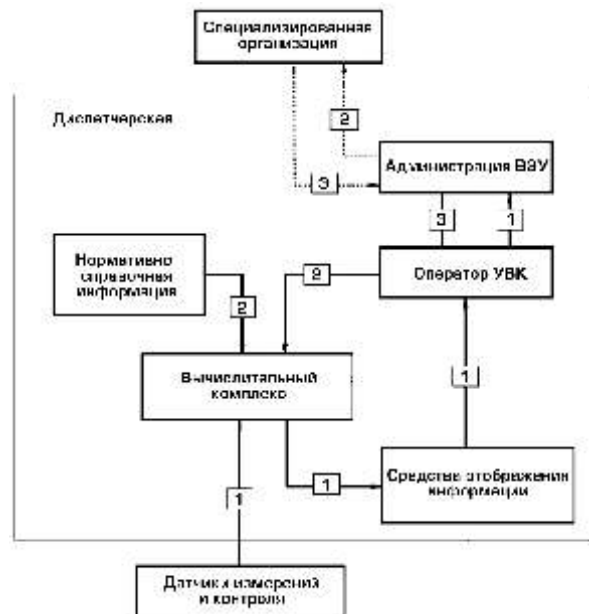


Рис. 5. Функциональная структурная схема системы диагностирования башни:

1 – информация о состоянии объекта; 2 – ввод информации; 3 – указания и расположения

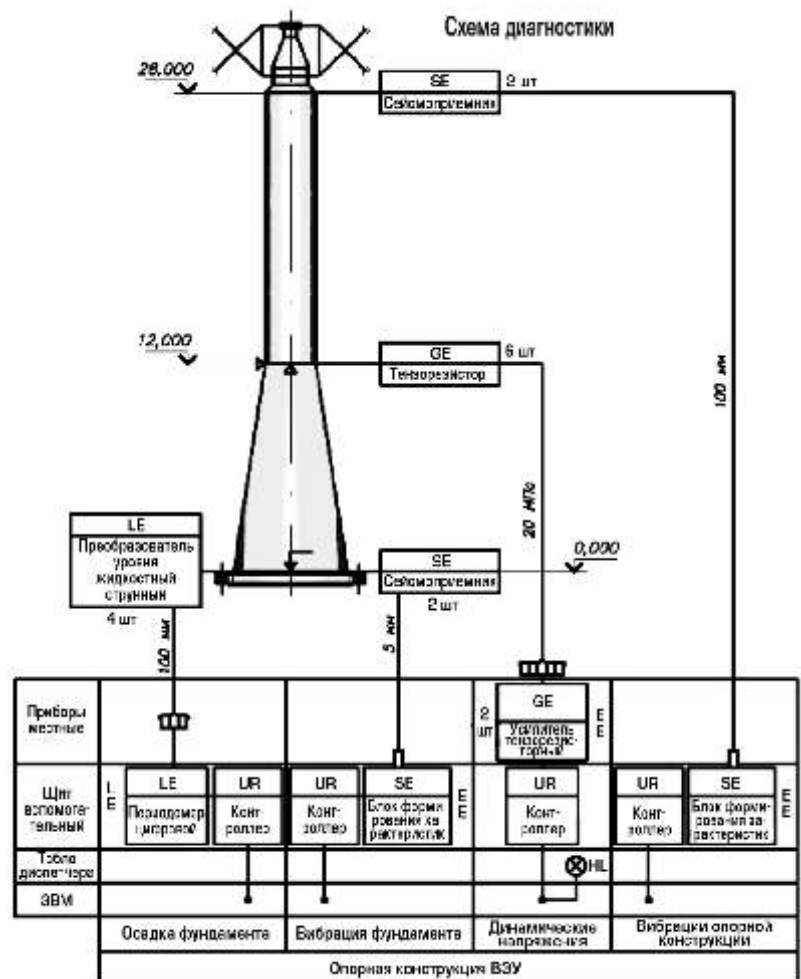


Рис. 6. Функциональная схема оснащения башни системой диагностики:

S – вибрация; G – деформация; L – уровень

Таблица 3

Продолжительность регистрации в течение эксперимента

Режим работы ВЭУ и вид воздействия	Измеряемые величины	Продолжительность регистрации измеряемых величин одного цикла измерений	Количество циклов измерений
1. Нерабочий, ветровое	1. Скорость ветра. 2. Направление ветра. 3. Амплитуды и частоты колебаний опорной башни	5 мин	До 15
2. Нерабочий, кинематическое	То же	До затухания колебаний от кинематического воздействия	До 10
3. Переходной (пуск и остановка ВЭУ)	1. Скорость ветра. 2. Направление ветра. 3. Амплитуда и частоты колебаний опорной башни и фундамента. 4. Напряжения в сечениях опорной башни	В течение длительности переходного режима	До 10
4. Рабочий установившийся режим при разных скоростях ветра	То же	В течение длительности переходного периода	До 10

ции, деформации и др.) в электрический сигнал. Информация от датчиков поступает по измерительным линиям связи на регистрирующие приборы и далее в вычислительный комплекс (см. схему диагностики, рис. 6).

Периодичность, время и последовательность опроса, объем необходимой информации, получаемой с каждого датчика, представлены в таблице 2 и таблице 3. Эти установленные требования, а также последовательность обработки, накопления, сравнение полученных данных с нормативными, способы предоставления информации оператору формализуются алгоритмом и программой.

Работа вычислительного комплекса осуществ-

ляется под руководством оператора. Данные, характеризующие работу опорной башни, регистрируются оператором, затем передаются администрации ВЭУ и далее в специализированную организацию, выполняющую научное сопровождение, испытания и экспериментальное исследование опорной башни. В случае появления дефектов или повышения измеренных параметров над предварительно заданными ВЭУ останавливается. Информация об остановке сообщается в специализированную организацию, которая определяет причины появления дефектов, разрабатывает рекомендации по их устранению и после ремонта дает разрешение на продолжение эксплуатации.

[1] Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов – М.: Мир, 1974. – 464 с.

[2] Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа – М.: Мир, 1983. – 312 с.

[3] ГОСТ 25-101-83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистическое представление результатов. Из-во стандартов, 1983, – 29 с.