

# МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ФУНДАМЕНТОВ ВЭУ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ МОНИТОРИНГЕ

**Б.Е. Резник** (Берлинский университет прикладных наук им. Бойта, Германия)

В 1982 г. окончил маркшейдерский факультет Ленинградского горного института (в настоящее время — Санкт-Петербургский горный университет) по специальности «прикладная геодезия». После окончания института работал в ГИПРОДОРНИИ, Ленметрострое и ВНИМИ. С 1993 г. работал инженером-геодезистом в области строительства дорог и тоннелей в г. Аахене, с 1995 г. — научным сотрудником в Бранденбургском техническом университете (г. Котбус), с 1997 г. — главным инженером в Институте геодезии и геоинформатики Ростокского университета. С 2004 г. — профессор инженерной геодезии и геоинформатики Берлинского университета прикладных наук им. Бойта (Beuth Hochschule für Technik Berlin). Кандидат технических наук.

В настоящее время ветроэнергетика вносит большой вклад в энергоснабжение Германии, благодаря специальной правительственной программе и огромным инвестициям последних лет. Необходимо учитывать, что почти половина действующих ветряных станций — ветроэнергетических установок (ВЭУ) была построена до 2003 г., и в текущем десятилетии закончится их запланированный срок эксплуатации, исчисляемый приблизительно двадцатью годами. Поэтому, кроме освоения новых территорий для парков ВЭУ, должны быть приложены усилия на содержание уже работающих ветряных станций (рис. 1). Основным условием для успешного решения этой задачи является сбор объективных данных о повреждениях на имеющихся ВЭУ, число которых с каждым годом увеличивается.

Поскольку лопасти ВЭУ, вращаясь в горизонтальной плоскости, передают энергию ветра на ротор генератора, расположенного в гондоле, опирающейся на металлическую или железобетонную башню и вращающейся относительно ее вертикальной оси, конструк-

тивные элементы башни испытывают значительные динамические нагрузки. В последние годы было установлено, что характерное слабое звено несущей конструкции ветроэнергетических установок, высота которых 100 м и более, находится в месте соединения башни с фундаментом. Типичной картиной повреждений на поверхности фундамента являются (рис. 2): расслоения внутри (а) и снаружи (б), проникновение воды (в) и кольцевые трещины (г). По мнению многих экспер-

тов, причиной таких явлений, кроме больших динамических нагрузок, могут быть скрытые дефекты при изготовлении фундамента или ошибки при проектировании. Чем раньше такие повреждения будут выявлены, тем больше вероятность предотвращения незапланированного простоя ВЭУ и ее дорогостоящего ремонта.

Благодаря быстрому развитию микроэлектроники, компьютерной техники и средств связи, в последние годы стало возможным постоянно контроли-



**Рис. 1**  
Типичный парк ВЭУ



Рис. 2

Типичные повреждения на поверхности фундаментов ВЭУ

ровать текущее состояние наиболее уязвимых и ответственных элементов конструкций и отдельных механизмов с высокой степенью достоверности. В области машиностроения в английском варианте такой принцип мониторинга технического состояния получил название Condition Monitoring (СМ), а система, которая его реализует, — Condition Monitoring System (СMS) [1]. Непрерывный и дистанционный контроль подобного рода разрабатывается по единому стандарту и выполняется на всех важных элементах и узлах современных ВЭУ, таких как ротор, генератор, механическая передача и т. д. Несмотря на известные проблемы и новые технические возможности, контроль состояния фундамента и закладных элементов башни ветряной станции до сих пор не является составной частью стандартного мониторинга. В последние годы автором статьи совместно с партнерами было реализовано несколько научных проектов и предложены различные концепции контроля и обработки информации для решения этой задачи [1]. Один из таких методов рассматривается в данной статье.

▼ Особенности контроля технического состояния фундаментов ВЭУ

Точно так же, как и у других составных элементов современных ВЭУ, контроль их несущих конструкций в рамках пос-

тоянного мониторинга технического состояния должен быть, прежде всего, бюджетным и эффективным. В отличие от специальных измерений в процессе разовой экспертизы на определенных фундаментах, подверженных риску разрушения, постоянный мониторинг выполняется непрерывно в течение многих лет и, как правило, на всех ВЭУ парка. Мониторинг имеет две основные цели — предотвращение особо опасных происшествий, таких как разрушение конструкции, и оптимизацию технического обеспечения. Неожиданное необратимое разрушение всей несущей конструкции в области соединения башни с фундаментом маловероятно. Дефекты в этом месте развиваются в течение многих лет и сопровождаются постепенным появлением трещин (рис. 2), которые могут быть своевременно обнаружены с помощью предписанного техническими инструкциями планового периодического визуального контроля. Таким образом, главной целью непрерывного контроля фундаментов в рамках СМ является раннее распознавание скрытых повреждений в несущей конструкции ветряной станции, с помощью которой может быть составлен обоснованный приоритетный план ремонтных работ и оптимально задействованы имеющиеся в наличии ресурсы. Как первоочередное решение возможно и временное отключение определенных поврежденных уста-

новок при особо сильном ветре и, соответственно, при значительных динамических нагрузках.

Полный визуальный анализ измерений, выполненных несколькими десятками датчиков только на одной ВЭУ, практически невозможен из-за слишком большого объема данных, собранных в течение длительного промежутка времени. Кроме того, нужно принять к сведению, что такие измерения контролируются не инженерами в области строительства, а сменными дежурными операторами, отвечающими за состояние всей установки. Результатом мониторинга фундамента должно являться небольшое количество характерных параметров, выбранных из всего объема измеренных данных, соответствующих определенным моментам времени, таких как собственные частоты колебаний, коэффициенты их затухания (декремент), наклоны или смещения между фундаментами и закладными элементами и т. д. На основе анализа параметров рассматриваемой установки выявляются существенные отличия их значений от характеристик других установок такого же типа или их отклонения от заранее заданной «нормальной» величины, и могут быть получены критерии о текущем состоянии наблюдаемого объекта в соответствии с категориями «хорошо», «критично» или «аварийно» («светофор» на рис. 3). В отличие от обработки измерений специ-

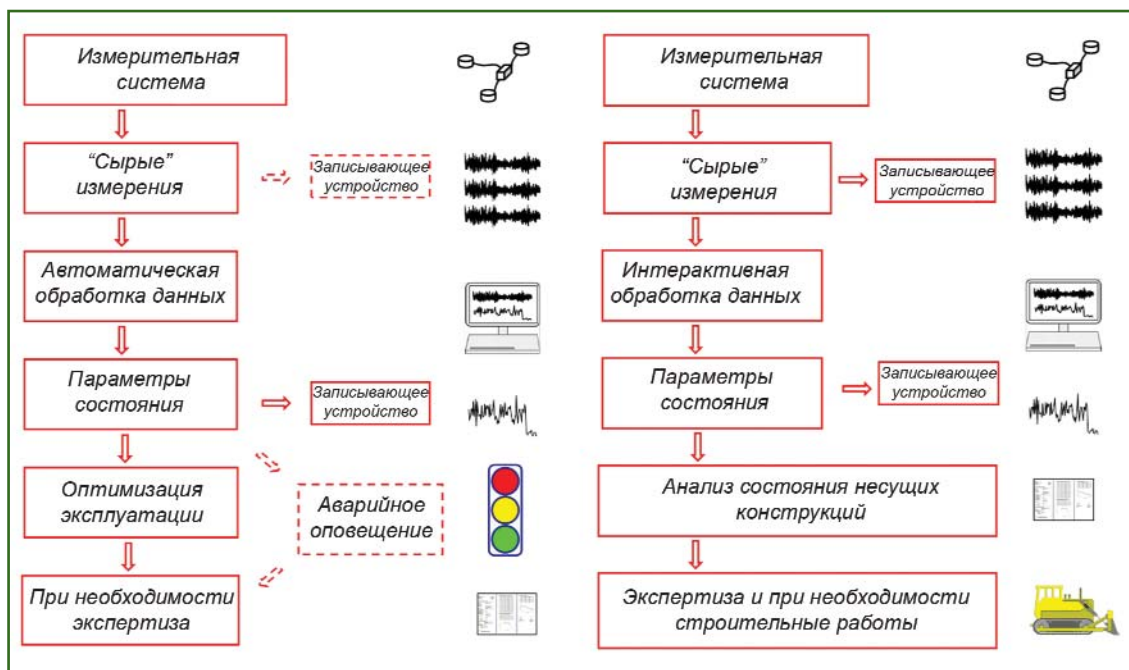


Рис. 3

Контроль технического состояния фундаментов: непрерывный автоматический мониторинг (слева) и специальная экспертиза (справа)

альной разовой экспертизы, обработка исходных данных в процессе мониторинга должна быть полностью автоматизирована.

Фундаменты ветряных станций, как и другие элементы, подвергаются регулярному (не реже одного раза в два года) техническому осмотру. В случае обнаружения значительных дефектов эксплуатационной службой, как правило, заказывается специальная техническая экспертиза, по результатам которой предлагаются меры для устранения дефектов. В особо критических случаях может быть предписана полная остановка ВЭУ и выполнение срочных ремонтных работ. Несмотря на наличие и совершенствование методов неразрушающего контроля для проведения таких исследований, на практике продолжают доминировать методы визуальной оценки возникающих трещин. Таким образом, результаты экспертизы фундаментов зависят, в основном, от субъективного

анализа состояния конструкций и опыта обслуживающего персонала. Непосредственные измерения или конкретные значения параметров, собранные в течение многих лет, могут использоваться в процессе экспертизы в качестве «истории болезни» и показывать объективные «симптомы» изменений состояния сооружения. По этим причинам долгосрочное хранение полученных данных, хотя и не является обязательной частью СМ, но может оказаться весьма полезным в отдельных случаях.

#### ▼ Система непрерывного контроля на основе датчиков наклона

Эффективный контроль состояния фундаментов ВЭУ в рамках СМ осуществляется с помощью различной измерительной техники. Автор статьи в последние годы были опробованы варианты решения этой задачи при помощи акселерометров (датчиков ускорений), моторизированных тахеометров, специальных лазерных

систем и некоторых других средств измерений. В данной статье рассматривается применение только точных датчиков наклона (инклинометров) и соответствующих алгоритмов обработки информации.

Для решения поставленной задачи использовались датчики Nivel серии 200 (Leica), работающие по принципу электронного уровня. Эти двухкоординатные устройства для измерения угловых перемещений и определения их направления по двум взаимоперпендикулярным осям [2, 3] показали себя как надежное и точное средство измерения. Их преимуществами являются высокая точность измерений (до 5 микрорадиан), а также надежная калибровка, гарантированная производителем. К недостаткам этих датчиков относится невозможность выполнять измерения с частотой выше 1–3 Гц, обусловленная конструкцией инклинометра. Кроме того, они имеют относительно небольшой рабочий диапазон измерения угла на-

клона — менее  $1/6^\circ$  ( $600''$ ), в результате чего усложняется их установка и использование на особо подвижных частях конструкций.

Описываемые ниже измерения выполнялись на типовой ВЭУ, башня которой представляет собой стальную трубчатую конструкцию высотой около 100 м, состоящую из отдельных сегментов длиной около 20 м с фланцевыми соединениями (рис. 4). Внутренний диаметр башни в нижней части составляет около 4 м и несколько уменьшается по высоте конструкции. Башня опирается на монолитный фундамент и крепится к нему с помощью закладной детали (1). Глубина закладки фундамента колеблется от 2,5 до 3,0 м. Первый фланец (2) трубы башни (3) находится на расстоянии 0,5 м от фундамента. Так как измерения непосредственно внутри монолитного фундамента практически невозможны без его частичного разрушения, то они выполняются на его поверхности. Как показывает многолетний опыт наблюдений на несущих конструкциях современных ВЭУ и последующая обработка и интерпретация их результатов, выбор точек контроля при мониторинге, на которые устанавливаются датчики измерений, имеет особенно большое зна-

чение для окончательных выводов.

Рассматриваемая система контроля состоит из значительного числа точных датчиков наклона, которые устанавливаются на стальной трубчатой конструкции башни и непосредственно на фундаменте. Они связаны с измерительным комплексом и работают в автоматическом режиме совместно с другими элементами непрерывного автоматического мониторинга (СМ). При выборе мест установки датчиков на несущих конструкциях необходимо исходить из того, что закладная деталь и первый фланец трубы при монтаже установлены «строго» горизонтально с высокой точностью. В целях контроля соединения стальной трубы башни с фундаментом датчики могут устанавливаться непосредственно на первом фланце трубы (датчик Т), что позволяет контролировать ее наклоны относительно фундамента при различных направлениях ветра. Установку датчика на фланце осуществить гораздо легче, чем на поверхности трубы башни. Если измеренные наклоны при сильном ветре превышают допустимые пределы, обусловленные эластичными сжатиями стальной трубы башни от фланца до закладной конструкции, это с большой ве-

роятностью означает, что в местах их соединения с фундаментом имеются повреждения. Если такие недопустимые наклоны происходят независимо от направления ветра преимущественно в одном и том же направлении, можно предположить, что в соответствующих секторах соединение между элементами повреждено. Такие участки в первую очередь должны подвергаться осмотру при технической экспертизе.

Известно, что закладные элементы башни рассматриваемой конструкции и, особенно, ее верхняя горизонтальная кольцевая часть подвергаются значительной динамической нагрузке. При этом в железобетонном фундаменте неизбежно возникают типичные горизонтальные и вертикальные напряжения на определенном расстоянии от основания башни и, как следствие, круговые трещины. Местоположение трещин от основания башни определяется не только глубиной закладных элементов башни в фундаменте, но и углом разрушения, который обычно составляет около  $40-60^\circ$ . Контроль таких относительных деформаций может быть реализован с помощью двух датчиков, один из которых (датчик FT) устанавливается как можно ближе к трубчатой конструкции башни, а второй (датчик F) — на расстоянии, приблизительно равном высоте первого фланцевого соединения трубы башни над поверхностью фундамента.

Комбинация расположения датчиков типа Т, FT и F на фундаменте ВЭУ может быть различной, например, в двух местах, ортогонально к оси башни, для того, чтобы имелась возможность контролировать деформации в различных направлениях при изменении направления ветра. Датчик, установленный дополнительно к указанным выше, приблизительно

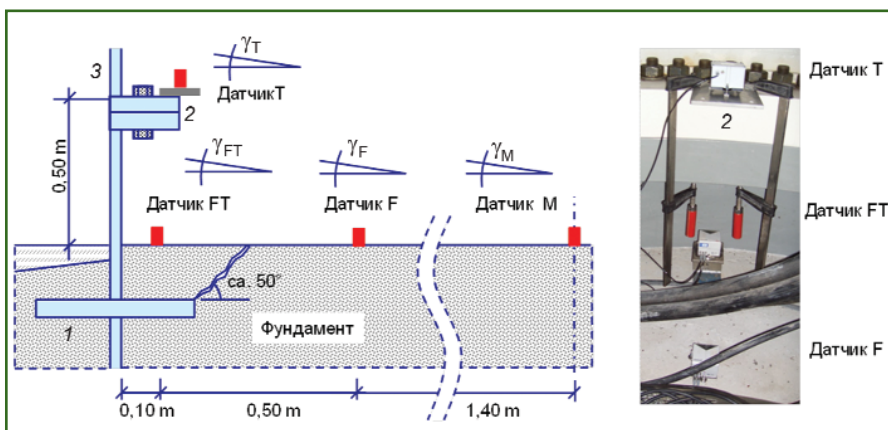


Рис. 4  
Измерительная система на основе датчиков наклона (образец)



в центре башни на поверхности фундамента (датчик М), позволяет контролировать дефекты для закладных деталей, расположенных на большей глубине в фундаменте башни и, кроме того, обеспечивать эффективный контроль результатов.

▼ **Концепция обработки данных**

Известно, что качество диагностики при мониторинге и, следовательно, эффективность технического решения этой задачи, в основном, зависят от используемых алгоритмов анализа. Как было отмечено выше, обработка измерений, реализующая концепцию СМ, предусматривает выбор небольшого количества характерных параметров из всего объема измеренных данных.

В качестве первого шага при обработке результатов измерений по разработанной методике мониторинга проводится их разделение на временные интервалы одинаковой длины. Все используемые датчики регистрируют наклоны одновременно в двух перпендикулярных друг к другу направлениях с заданной частотой. Параллельность осей различных датчиков вдоль одного направления, например, Т, FT, F и М (рис. 4), обеспечивается при их установке. В последующем эти оси будут обозначаться как «радиальные» к соответствующему центру башни, а перпендикулярные к ним оси — как «тангенциальные». Вычисленные углы наклона на контрольных точках описывают только их изменение в процессе эксплуатации и не являются абсолютными значениями, так как их начальное положение, например, по отношению к плоскости первого фланца башни, не известны. По этой причине на начальном этапе обработки данных автоматически вычисляются средние значения углов

для каждого интервала по обеим названным осям и отклонения от них в определенные моменты времени:  $\gamma_x$  (радиальные отклонения) и  $\gamma_y$  (тангенциальные отклонения). Благодаря разделению измерений на сравнительно небольшие временные интервалы и приведению результатов к их средним величинам, исключается влияние систематических ошибок измерений, например, таких, как незначительный температурный дрейф, нестабильность «нуля» и т. д.

Обширные тестовые измерения на различных ВЭУ показали, что прямое сравнение результатов измерений на контрольных точках по соответствующим осям, например, «радиальных» к «радиальным», не поддается надежной интерпретации. Поэтому на основе таких измерений на следующем этапе обработки вычисляются максимальные углы наклона в каждой контрольной точке. Для этого углы  $\gamma_x$  и  $\gamma_y$  трансформируются в полярные значения:

$$\gamma_A = \sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2};$$

$$\alpha_A = \arctan(\gamma_x/\gamma_y),$$

где  $\gamma_A$  соответствует максимальному значению наклона плос-

кости в точке измерения, а  $\alpha_A$  — его дирекционному углу в локальной ортогональной системе координат (X, Y).

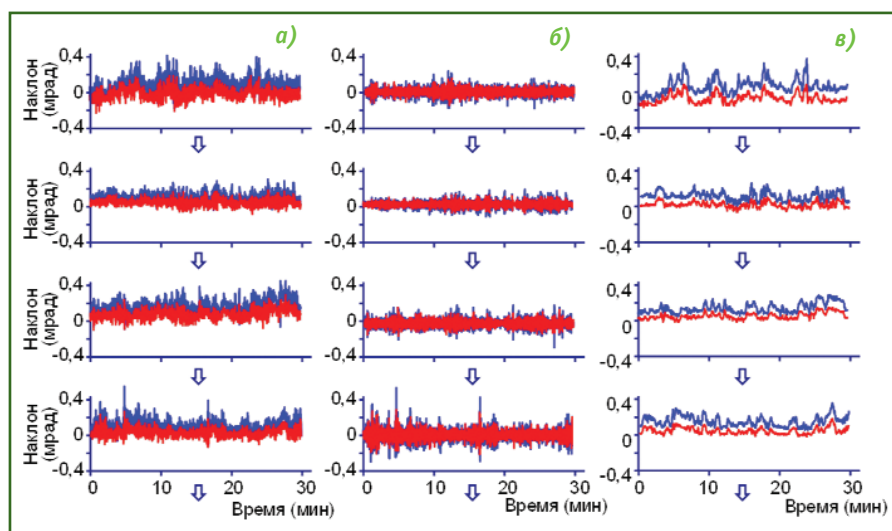
Для лучшей интерпретации полученных результатов может быть выбрана и другая система координат, например, ориентированная на преимущественное направление ветра в рассматриваемом районе.

Благодаря большому числу тестовых измерений на различных ВЭУ, было также установлено, что полученные данные об изменениях наклона состоят из двух компонентов с различными физическими и, следовательно, математическими характеристиками:

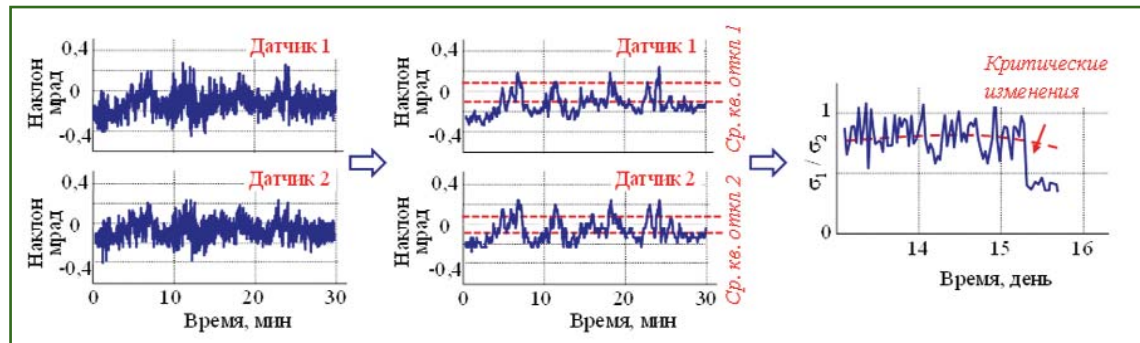
— относительно быстрые колебания с периодами от 10 секунд и менее (с частотами от 0,1 Гц до 1,5 Гц) при использовании датчиков с частотой измерения около 3 Гц;

— относительно медленные изменения наклона с периодами в 10 секунд и более, как результат «систематических» воздействий на несущие конструкции ВЭУ.

Для осуществления отдельного анализа исходные измерения обрабатывались с помощью



**Рис. 5**  
 Фильтрация измеренных значений одного датчика (интервалы по 30 минут): а) исходные измерения; б) высокочастотный сигнал; в) низкочастотный сигнал



**Рис. 6**  
Концепция обработки данных и анализа их результатов

математического фильтра. Результаты такой обработки с частотой разделения, равной 0,2 Гц, наглядно представлены на рис. 5 на примере четырех типичных интервалов времени. Верхние линии (синего цвета) на этих графиках получены с помощью датчика FT (рис. 4), расположенного возле внутренней части трубы башни, а нижние (красного цвета) — на датчике F, ближе к центру фундамента. На каждом интервале после обработки исходных измерений образуются две составляющие в виде различных временных рядов, обозначенных как высокочастотный и низкочастотный сигнал. Первый временной ряд отражает колебания в диапазоне приблизительно до 1,5 Гц, и его можно сравнить с результатами измерений типичными акселерометрами. Второй временной ряд (низкочастотный сигнал) представляет собой относительно медленные «систематические» изменения наклона. Эта составляющая отражает реакцию несущих конструкций на изменения метеорологических и технологических параметров, таких как одностороннее давление ветра или пространственная ориентировка гондолы наверху башни.

В разработанной методике СМ с помощью датчиков наклона анализируются не однократные события, например, реак-

ция на особо сильные порывы ветра и т. п., а средние характеристики зарегистрированных параметров. Для того, чтобы получить информацию о состоянии исследуемого объекта (фундамента ВЭУ и его закладных деталей) из характерных значений ограниченной выборки (относительных изменений наклона на определенных точках измерений), могут быть применены статистические методы. При непрерывной обработке информации используются разбросы вычисленных величин относительно среднего значения для каждого интервала или соответствующие средние квадратические отклонения ( $\sigma$ ). Абсолютные значения этих величин в каждой контрольной точке зависят от актуальных и по большей части недостаточно точно известных метеорологических параметров, таких как сила и направление ветра, а также от технологических параметров, например, ориентации гондолы. В связи с этим в качестве контрольного параметра (рис. 3) принимаются не абсолютные значения средних квадратических отклонений отдельных датчиков, а их отношения ( $\sigma_1/\sigma_2$ ) для отобранных пар. Применение этого алгоритма имеет смысл только при сильном ветре. В противном случае вычисленные отклонения соответствуют неизбежным ошибкам

(«шумам») измерений, и их отношение для датчиков одного типа стремится к единице. По этой причине в предлагаемом алгоритме учитываются пороговые значения, соответствующие примерно трехкратным величинам таких «шумов», и только при их превышении вычисляются параметры —  $\sigma_1/\sigma_2$ .

Полная концепция обработки данных представлена на рис. 6. Она может быть реализована автоматически и, таким образом, соответствует требованиям СМ.

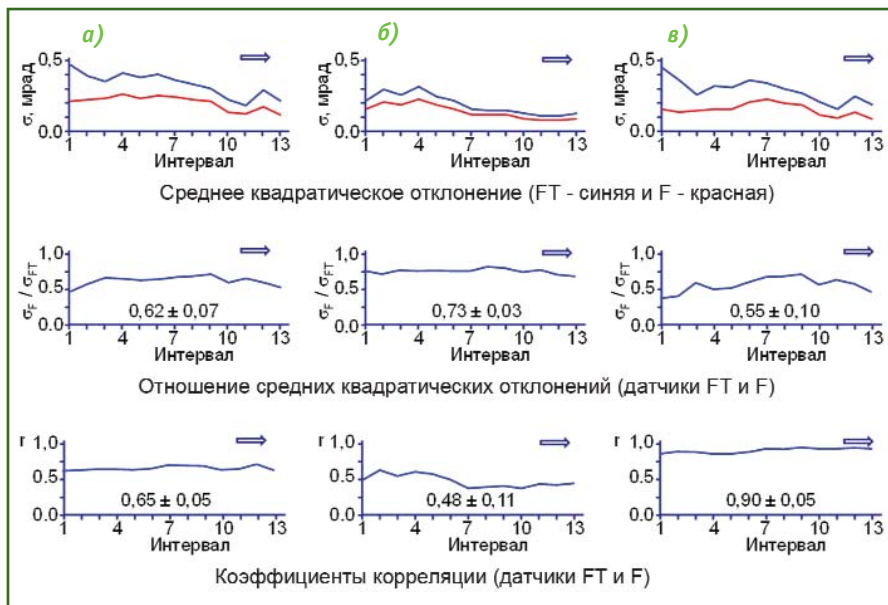
▼ **Результаты тестовых измерений**

С целью подтверждения пригодности описанной выше методики для заблаговременного распознавания опасных дефектов в фундаментах ВЭУ, она должна быть протестирована в течение нескольких лет на нескольких установках с несущими конструкциями, находящимися в различном состоянии. Эти конструкции необходимо обследовать не только описанным выше способом, но и другими методами контроля. В данной статье представлен один небольшой практический пример тестовых измерений такого рода, главной целью которого являлось определение оптимального места размещения датчиков на несущих конструкциях во время мониторинга. Измерения проводились на типовой двухмегаватной ветроэнергети-

ческой установке со стальной трубчатой конструкцией башни, описанной выше.

Из результатов измерений, полученных в течение нескольких недель, в статье рассматриваются только 13 интервалов по 30 минут, следующих друг за другом. Данный период был выбран, поскольку в это время наблюдалась особенно стабильная ветровая нагрузка (8–10 м/с на уровне высоты гондолы). В качестве примера приведем результаты измерений датчиками F и FT, расположенными с двух сторон от видимых трещин исследуемой ВЭУ (рис. 4). На рис. 5 представлены углы наклона  $\alpha$  в качестве исходных измерений и соответствующие им отфильтрованные значения (высокочастотный и низкочастотный сигнал) обоих датчиков для нескольких типичных интервалов времени. Результаты обработки измерений по описанной методике для всех отобранных интервалов приведены на рис. 7.

Существенные изменения в амплитудах колебаний обоих датчиков на верхних графиках могут быть объяснены варьирующимися метеорологическими условиями. Тем не менее, приведенные коэффициенты корреляции между этими временными рядами составляют около 0,6. Таким образом, подтверждается сделанное ранее предположение, что отношение амплитуд деформаций при различных условиях остается стабильным. У низкочастотного сигнала коэффициент корреляции существенно вырастает по отношению к исходным измерениям до величины более 0,9. Оба параметра имеют в этом частотном интервале практически функциональную зависимость друг от друга. У высокочастотной составляющей этот коэффициент, напротив, несколько уменьшается до 0,5. В этих составляющих временных

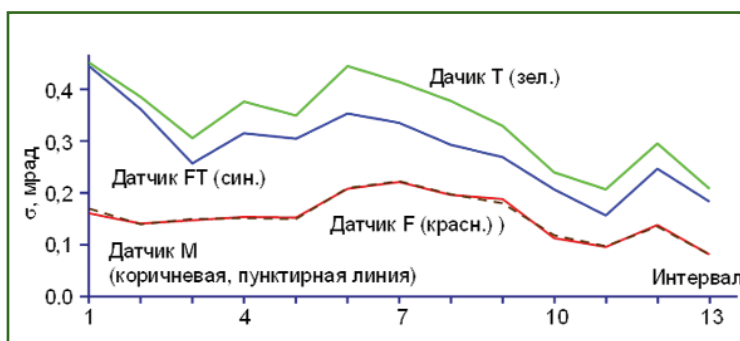


**Рис. 7**  
Избранные результаты обработки данных (интервалы по 30 минут):  
а) исходные измерения; б) высокочастотный сигнал; в) низкочастотный сигнал

рядов, очевидно, в значительно большем объеме отражаются «шумы» обоих датчиков. Как можно увидеть из представленных на рис. 7 отношений вычисленных средних квадратических отклонений  $\sigma_F / \sigma_{FT}$ , после применения высокочастотного фильтра их среднее значение составляет приблизительно 0,7. Такие же отношения средних квадратических отклонений были получены при параллельных измерениях с помощью акселерометров на этих же контрольных точках и в таком же частотном диапазоне (0,2–1,5 Гц), что убедительно

подтверждает качество проведенного анализа. После применения низкочастотного фильтра отношение средних квадратических отклонений имеет, напротив, существенно меньшую величину. Кроме того, этот основной параметр контроля изменяется в течение времени в значительно большем диапазоне.

При анализе полученных результатов необходимо принять во внимание, что один современный парк ВЭУ состоит, как правило, из 15–20 или более ветровых станций. Поэтому затраты времени на проведение

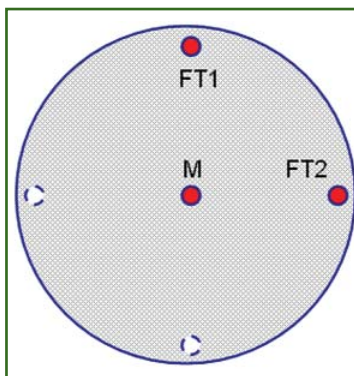


**Рис. 8**  
Совместный анализ результатов тестовых измерений (низкочастотный фильтр)



измерений и обработку данных одной ветровой станции, которые зависят от количества датчиков, должны быть минимизированы. Анализ результатов тестовых измерений позволяет выбрать оптимальное количество датчиков, определить их эффективное расположение для решения поставленной задачи. На рис. 8 представлены результаты измерений (средние квадратические отклонения  $\sigma$ , после применения низкочастотного фильтра) на всех четырех датчиках — Т, FT, F и М (рис. 4) описываемых тестовых измерений.

На основе приведенных результатов можно утверждать, что закладная деталь стальной трубы башни приходит в движение вместе с прилегающей частью фундамента. Между результатами, полученными с помощью датчика FT (на краю фундамента) и датчика Т (на первом фланце), имеются не такие существенные различия, как по отношению к датчику F. Различия между измерениями на датчиках Т и F могут однако возникать как из-за напряжения вдоль видимой трещины между ними, так и из-за наклона башни до высоты, на которой расположен датчик Т (около 0,5 м). Оба процесса могут накладываться друг на друга, в связи с чем интерпретация результатов значительно усложняется. По этим причинам предлагается отказаться от датчика Т при решении поставленной задачи. Между результатами, полученными с помощью датчика М (в середине фундамента) и датчика F (на фундаменте вне трещины), не имеется существенных отличий, особенно в области низкочастотных сигналов. Таким образом, датчик в середине фундамента может заменить несколько датчиков F, расположенных вне трещины, без ущерба для последующей интерпретации ре-



**Рис. 9**  
Рекомендуемая измерительная схема контроля

зультатов. По названным выше причинам для дальнейшего использования в рамках мониторинга рекомендована измерительная схема из трех или пяти датчиков (рис. 9).

Выполненные исследования позволяют сделать несколько выводов.

Интерпретация полученных параметров на различных контрольных точках в виде отношения величин средних квадратических отклонений ( $\sigma_1/\sigma_2$ ) может применяться как для датчиков ускорений, так и для датчиков наклона. Распространение колебаний башни во всех диапазонах частот в фундаменте сопровождается потерей энергии и, как следствие, уменьшением амплитуд колебаний. Чем больше эти потери, например, из-за развития внутренних трещин в бетоне и пустот в районе закладных частей, тем меньшую величину имеют определенные описанным методом параметры для отобранных пар контрольных точек. Таким образом, эти параметры могут быть успешно задействованы для оценки состояния несущих конструкций.

Обширные тестовые измерения на различных ВЭУ в последние годы подтвердили большой потенциал описанного метода на основе датчиков наклона для долгосрочного прогнозирования возможных дефектов на

фундаментах ВЭУ. Тем не менее, такое решение задачи еще уступает по эффективности измерительным системам на основе акселерометров. Для измерения ускорений в настоящее время могут применяться сравнительно недорогие чувствительные элементы массового рынка, так называемые МЕМС-датчики.

При использовании датчиков наклона должны быть выдержаны высокие требования к точности измерений, значительно лучше, чем 1 микрорадиан. Такая точность в настоящее время достигаются только специальными средствами измерений, например датчиками наклона типа Nivel серии 200. По этой причине при контроле высокочастотных колебаний датчики ускорений являются более эффективными. В то же время анализ сравнительно медленных деформаций с периодами от 10 секунд и более в целях мониторинга не может быть реализован датчиками ускорения. Таким образом, обе системы контроля (на основе измерения ускорений и углов наклона) могут при необходимости успешно дополнять друг друга.

#### ▼ Список литературы

1. Development of concepts for an early identification of security-relevant defects in concrete bases of wind turbines in terms of Condition Monitoring Systems. — <http://prof.beuth-hochschule.de/resnik/wesafe-project-english>.
2. Яценко А.И. От водяного уровня до высокоточного инклинометра // Геопрофи. — 2010. — № 4. — С. 17–19.
3. Яценко А.И. Области применения цифровых инклинометров // Геопрофи. — 2010. — № 5. — С. 57–59.
4. Резник Б.Е. Непрерывные геодезические измерения деформаций строительных конструкций эксплуатируемых сооружений // Геопрофи. — 2008. — № 4. — С. 4–11.