



ISSN 1814-5566
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS
10, N2 (2006) 149-160
УДК 620.91:621.311+624.97.042

(06)-0114-1

МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ГРАТЧАСТОЇ БАШТИ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Є.В. Горохов, М.В. Бусько, С.В. Турбін

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури, вул. Державіна 2,
86123, м. Макіївка, Україна.
E-mail: sergey@ict.dn.ua*

Отримана 04 листопада 2005; прийнята 14 квітня 2006

Анотація. Одним із напрямків підвищення надійності башт вітроелектричних установок (ВЕУ), є недопущення виникнення резонансних явищ при їх експлуатації. В даній статті приводяться методика і результати чисельних і натурних експериментальних досліджень динамічної поведінки ґратчастої башти висотою 36 м для вітроагрегату типу USW 56-100.

Ключові слова: вітроелектрична установка, баштова конструкція, динамічна поведінка.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ РЕШЕТЧАТОЙ БАШНИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Е.В. Горохов, М.В. Бусько, С.В. Турбин

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина 2,
86123, г. Макеевка, Украина.
E-mail: sergey@ict.dn.ua*

Получена 4 ноября 2005; принята 14 апреля 2006

Аннотация. Одним из направлений повышения надежности башен ветроэлектрических установок (ВЭУ), является недопущение возникновения резонансных явлений при их эксплуатации. В данной статье приводятся методика и результаты численных и натурных экспериментальных исследований динамического поведения решетчатой башни высотой 36 м для ветроагрегата типа USW 56-100.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, башенная конструкция, динамическое поведение.

PRINCIPLES AND RESULTS OF THE INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF LATTICE TOWER FOR WIND TURBINE

Ye. V. Horokhov, M. V. Busko, S. V. Turbin

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Derzavin str. 2,
86123, Makeyevka, Ukraine.*

E-mail: sergey@icm.dn.ua

Received 4 November 2005; accepted 14 April 2006

Abstract. The main way of reliability increasing of wind turbine latticed towers is non-admission of resonance oscillations under their exploitation. The principles of and results of the field observation and numerical investigations of dynamic behavior of lattice tower for wind turbine USW 56-100 with the height 36 meters are showed in the article.

Keywords: lattice tower, wind turbine, dynamic behavior, field observations.

Введение

Начиная с 1996 года, Украина стала на путь интенсивного развития нетрадиционной области в энергетике – ветроэнергетики. На сегодняшний день это 6 промышленных ветроэлектростанций (ВЭС) различной проектной мощности, на которых уже эксплуатируются более 500 шт ветроагрегатов типа USW 56-100. Первые годы эксплуатации показали их низкую производительность, что потребовало выявления причин и разработки рекомендаций по ее повышению. Как оказалось, одной из причин неудовлетворительной выработки является расположение ветроагрегатов на недостаточной высоте – 18 метров. В качестве выхода из сложившейся ситуации было предложено увеличить ее до 36-45 м путем введения под существующие башни подставок, что было бы наиболее рациональным с точки зрения повышения выработки и уменьшения срока окупаемости объекта [1].

К особенностям эксплуатации башен ветроэлектрических установок можно отнести восприятие ими сильных вибраций, обусловленных работой электрогенерирующего оборудования. Поэтому возникает необходимость оценки динамического поведения конструкции, чтобы не допустить возникновения резонансных явлений при ее эксплуатации.

С целью изучения динамического поведения запроектированной решетчатой башни рациональной высоты, в качестве которой было принято значение 36 м, был выполнен комплекс

численных и натурных экспериментально-исследовательских работ.

В сегодняшней инженерной практике для численного решения задач динамики все большее применение находят универсальные вычислительные комплексы, в основу работы которых положен метод конечных элементов. Более детально представляя проектируемое здание или сооружение, проектировщик имеет возможность с большей достоверностью изучить реальные эффекты их поведения. Основным в этом случае будет правильное построение расчетной схемы: корректное описание параметров жесткости элементов системы, типа узловых соединений, свойств грунтовых оснований. Ведь меняя структуру конструктивной схемы или должным образом не учитывая характеристики материалов, можно получить заведомо неверные результаты расчета.

Результаты численных исследований

Запроектированная башня (рис. 1) представляет собой стальную конструкцию, состоящую из двух секций высотой по 18,0 м. Размеры башни в уровне обреза фундаментов составляют 6,7х6,7 м, в уровне оголовка - 0,5х0,5 м. Пояса и решетка башни выполнены из равнополочных уголков, которые крепятся между собой при помощи болтов нормальной точности. Тип решетки – перекрестная с несовмещенными узлами в двух смежных гранях. В уровне базы башни выполнены ригеля из спаренных уголков. На отметке 18,0 м имеется диафрагма и

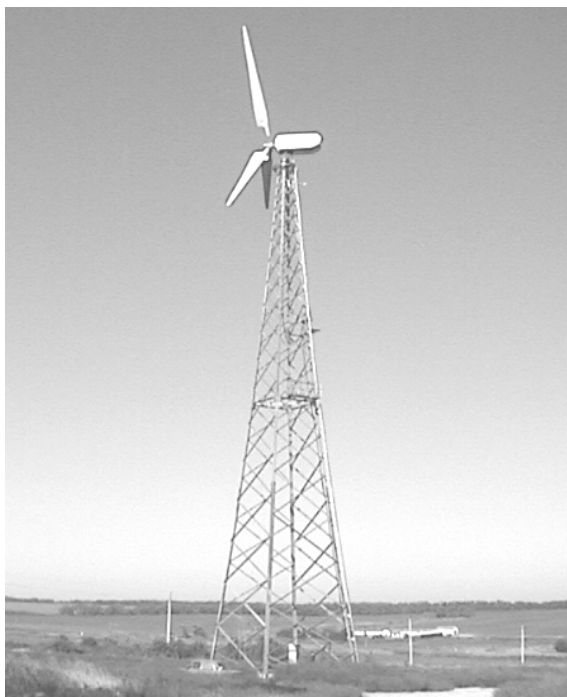


Рис. 1. Внешний вид башни высотой 36 м, для ветроагрегата типа USW 56-100.

площадка для отдыха, в уровне оголовка – технологическая площадка. Масса нижней секции башни составила 6770 кг, верхней – 4650 кг.

Фундамент запроектирован в виде четырех одинаковых свай, объединенных балочным раскосным ростверком. Масса ветроагрегата типа USW 56-100 составила 4180 кг. Скорость вращения ротора – 72 об/мин. Лопасти (3 шт.) выполнены из композиционного стекловолокна, их длина 8,3 м, масса – 160 кг/шт.

Для численного решения задач динамики использовался универсальный вычислительный комплекс SCAD. Первоначально для оценки степени влияния способа представления ветроагрегата в расчетной схеме на изменение частотного поведения сооружения были выполнены расчеты, в которых ветроагрегат моделировался тремя различными способами: как дополнительная точечная масса в уровне оголовка башни (рис. 2 а), как масса, распределенная по консоли (рис. 2 б), как масса, распределенная по консоли с учетом распределенной массы от лопастей (рис. 2 в). Для учета возможного поворота ветроэнергетической машины в процессе работы, ее расположение на башне варьировалось и было принято 0° и 45° .

Ряд форм собственных колебаний башни ВЭУ соответствует наибольшим амплитудам вибрации на отдельных конструктивных элементах (раскосах, лопастях), поэтому анализу подвергались три первые формы собственных

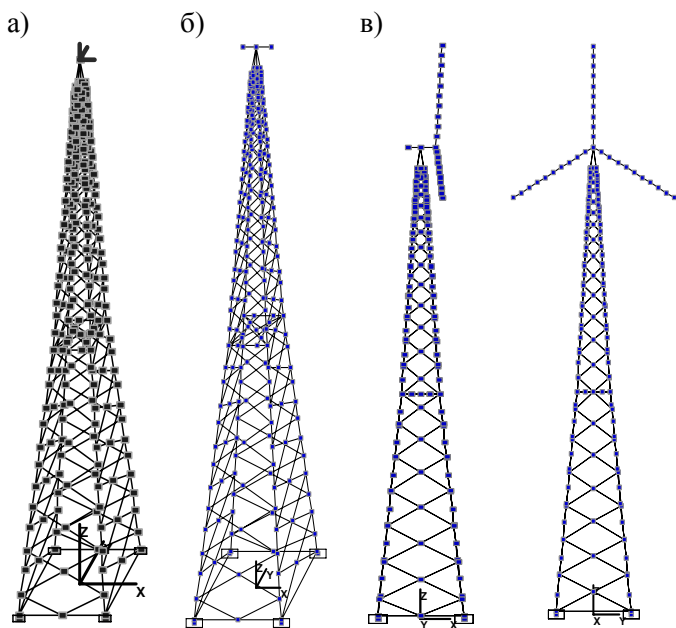


Рис. 2. Расчетные схемы башни ВЭУ при различных вариантах представления ветроагрегата.

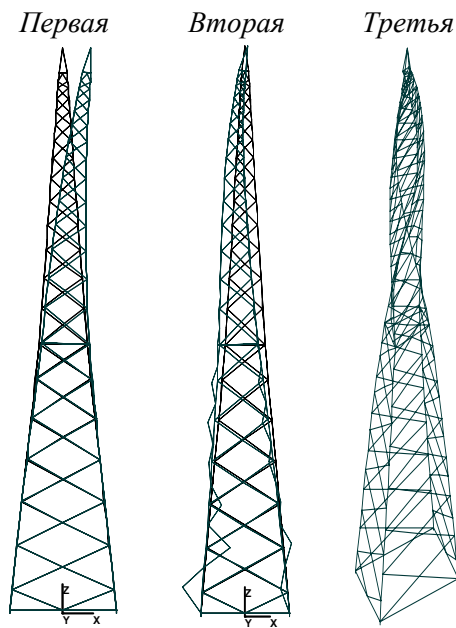


Рис. 3. Формы собственных колебаний башни ВЭУ.

колебаний основной системы (рис. 3), которые рассматривались отдельно вдоль осей X и Y.

На основании результатов расчетов были сделаны выводы о том, что изменение положения ветроагрегата на башне, вызванное его разворотом относительно вертикальной оси, не оказывает существенного влияния на частоту собственных колебаний сооружения, изменяя ее не более чем на 1%. Представление ветроагрегата в расчетной схеме как массы, распределенной по консоли, или с учетом распределенной массы от лопастей не приведет к существенному изменению частот собственных колебаний по сравнению с вариантом его представления как дополнительной массы в узле. Изменения не превысят 5%, тогда как возрастет трудоемкость построения расчетной схемы и анализа форм собственных колебаний. В результате было принято решение дальнейшие исследования проводить, представляя ветроагрегат как дополнительную точечную массу в уровне оголовка башни.

Для учета особенностей, возникающих в процессе эксплуатации башенной конструкции, в частности, ослабления болтовых соединений (разболчивания), был выполнен анализ изменения ее частотных характеристик при жестком и шарнирном условиях примыкания элементов решетки к поясам. Одновременно выполнялась оценка степени влияния фундамента и основания на изменение частоты собственных колебаний сооружения.

После анализа полученных результатов было отмечено, что изменение жесткости узлов примыкания раскосов к поясам следует учитывать при анализе колебаний по третьей форме. В других случаях частота собственных колебаний будет изменяться не более чем на 3%. Учет совместной работы башни ВЭУ с фундаментом и основанием изменяет (уменьшает) значения частот собственных колебаний сооружения по сравнению с жестким условием ее закрепления в основании на величину до 6 % при колебаниях по первой форме; до 18 % - по второй; до 1 % - по третьей, что требует своего отображения при численном изучении динамического поведения конструкции.

Теоретические значения частот собственных колебаний башни ВЭУ составили $f_1=1,51$ Гц; $f_2=7,39$ Гц; $f_3=14,35$ Гц. Учитывая значения

частот вынужденных колебаний (основная частота, определяемая числом оборотов ротора в единицу времени $f^*=1,2$ Гц, и дополнительная, определяемая числом прохождения лопастей возле башни $f^{**}=3,6$ Гц), а также требования, выдвигаемые нормативными документами, относительно частотной настройки сооружения [2]:

$$0,3 < \frac{f_6}{f_0} < 0,95 \quad \text{или} \quad 1,05 < \frac{f_6}{f_0} < 1,4, \quad (1)$$

где f_6 — частота вращения ветротурбины; f_0 — частота собственных колебаний сооружения, был сделан вывод, что запроектированная конструкция будет удовлетворять требованиям о недопустимости возникновения резонансных явлений в процессе ее эксплуатации.

С целью изучения действительного поведения конструкции башни, а также для корректировки и разработки обоснованных методов расчета подобных сооружений было выполнено ее экспериментальное исследование.

Методика проведения эксперимента

Башня высотой 36 м для ветроагрегата типа USW 56-100 смонтирована на площадке Новоазовской ВЭС. Динамический характер поведения башенной конструкции определяет как работающее на ней оборудование – ветроагрегат, так и ветровое воздействие, что потребовало синхронного измерения как внешних (скорость и направление ветра), так и внутренних (механические напряжения и уровень вибрации) параметров системы.

Для определения скорости и направления ветра использовался ультразвуковой анеморумбометр 2D фирмы Thies Clima (Германия), который был смонтирован на отметке 32,0 м с наветренной стороны конструкции (рис. 3, 5). Причем измерительный прибор размещался так, что его нулевой отсчет соответствовал ортогональному направлению по отношению к грани башни.

Реакция конструкции фиксировалась с помощью измерителей вибрационной скорости и петлевых тензорезисторов с базой 20 мм и паспортным сопротивлением 200,2 - 200,5 Ом. ВЭГИКи располагались на площадке обслужи-



Рис. 3. Внешний вид ультразвукового анемо-румбометра на башне ВЭУ.



Рис. 4. Расположение ВЭГИКов на технологической площадке башни ВЭУ.

вания в уровне оголовка башни взаимоперпендикулярно ее граням (рис. 4, 5). Тензодатчики крепились к поясам башни в уровне базы и на отметке +18,500 м (рис. 5) для получения информации об изменении напряжений при колебаниях соответствующих первой и второй формам. Предварительный анализ поведения сооружения и его конструктивных элементов позволил выявить резонансные явления в опорных раскосах в режиме работы ветроагрегата, поэтому было принято решение установить тензодатчики также и посередине их длины. Для крепления датчиков использовался клей типа Super Glue. Элементы конструкции предварительно подготавливались, удалялись продукты коррозии и существующего антикоррозионного покрытия и обезжиривались.

Для осуществления сбора информации с первичных преобразователей использовалась универсальная система мониторинга конструкций «УСМК-1», разработанная в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Опрос всех первичных преобразователей проводился с частотой 64 Гц, что позволило обеспечить представительность измерений в диапазоне $f \in [0; 32]$ Гц.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились в течение 4-х дней, в результате была записана 21 реализация продолжительностью по

60 мин, что позволило зафиксировать практически все режимы работы ВЭУ (резерв, запуск, генерирование электроэнергии, остановка).

Как известно, движение воздушных масс является весьма нестационарным процессом, с постоянно меняющимися значениями скорости, направления ветра, а также уровня его турбулентности [3]. Однако в определенные мо-

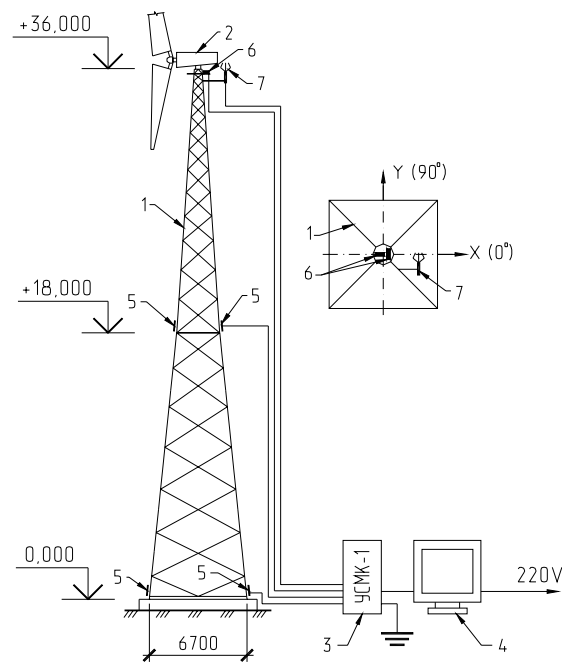


Рис. 5. Схема проведения эксперимента 1 – башня; 2 – ветроагрегат; 3 – система мониторинга "УСМК-1"; 4 – ПК; 5 – тензорезисторы; 6 – ВЭГИК; 7 – анемометр.

менты времени, при установившемся ветровом течении, этот процесс с определенной вероятностью может рассматриваться как стационарный [4]. Используя ряд практических критериев [5], в частности, критериев серий и тренда, которые позволяют выявить соответственно колебательный или монотонный тренд в последовательности средних значений случайной величины, были проанализированы реализации скоростей ветра и для дальнейшего анализа отобраны те из них, которые удовлетворяют условиям стационарности.

Как анемометр на время проведения эксперимента крепился непосредственно к башне, то ее колебания, а также вибрации от ветроагрегата могли повлиять на точность результатов его работы. Для **оценки степени влияния колебаний** был выполнен анализ графиков автокорреляционных функций и энергетических спектров изменения скорости ветра. При этом автокорреляционная функция будет иметь вид:

$$K_u(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) u(t + \tau) dt, \quad (2)$$

где T – время наблюдения сигнала; τ – переменная временная задержка; $u(t)$ и $u(t + \tau)$ – значение скорости ветра в момент времени t и $t + \tau$.

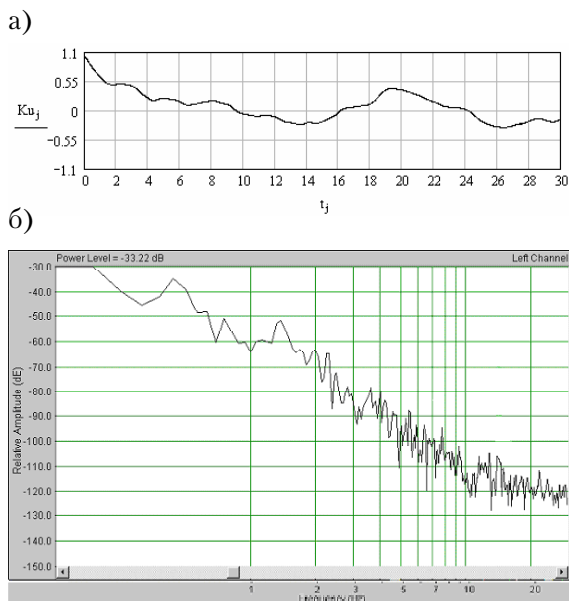


Рис. 6. График автокорреляционной функции (а) и энергетического спектра (б) скорости ветра в режиме резерва ветрогенератора.

Анализируя графики автокорреляционных функций для режима резерва (рис. 6 а) и рабочего режима (рис. 7 а) ветроагрегата, нельзя сделать вывод о наличии какой-либо гармонической составляющей. Однако, на энергетическом спектре соответствующему рабочему режиму ветроагрегата (рис. 7 б) четко просматривается пик на частоте 3,64 Гц. Его появление обусловлено воздействием присоединенной к лопастям массы воздуха в момент их прохождения вблизи башни, причем значение спектрального максимума превышает общий уровень спектра на ~20 дБ. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что колебания конструкции башни как в режиме резерва, так и в рабочем режиме ветроагрегата не влияют на работу анемометра, а колебаниями вызванными вращением лопастей можно пренебречь.

На основании зарегистрированных реализаций сигналов скорости u и направления α ветра (рис. 8), а также напряжений в поясах башни в уровне базы была произведена **оценка ее чувствительности** по отношению к изменению ветрового напора, значение которого определялось согласно [6] по формуле $P = 0,61u^2$. При этом значение коэффициента чувствительности определялось как при разных значениях средней скорости ветра, так и при различных режи-

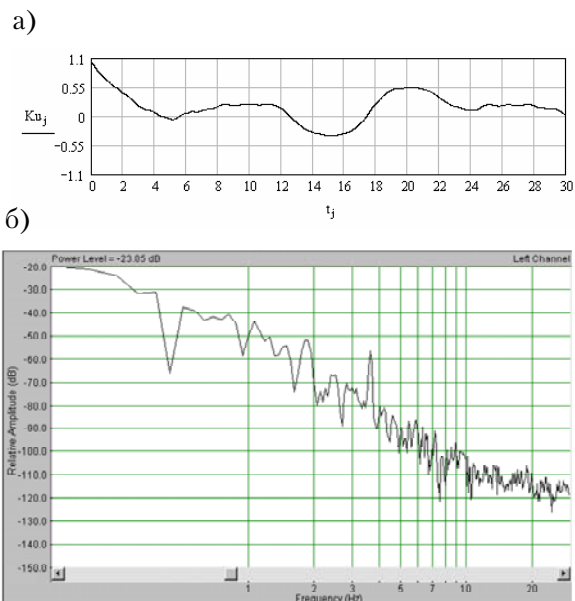


Рис. 7. График автокорреляционной функции (а) и энергетического спектра (б) скорости ветра в рабочем режиме ветрогенератора.

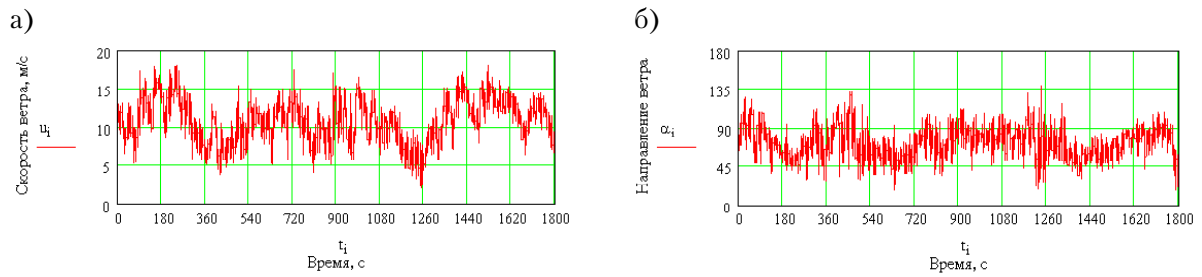


Рис. 8. Характерная реализация изменения скорости (а) и направления (б) ветра.

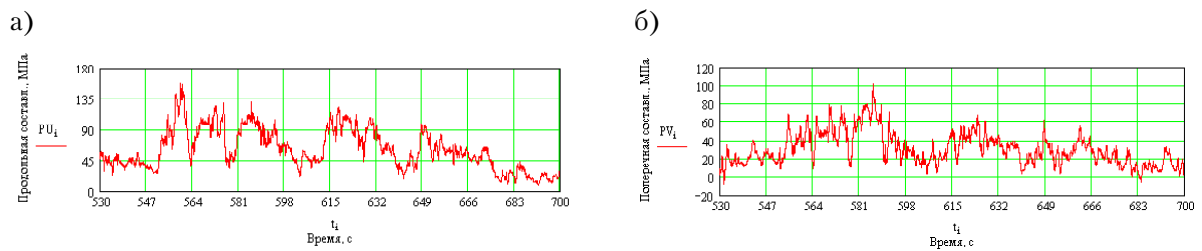


Рис. 9. Изменение продольной (а) и поперечной (б) составляющих ветрового напора.

мах эксплуатации ветрогенератора (режим резерва и генерирования электроэнергии), используя выражение

$$\Sigma = \frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_p}, \quad (3)$$

где σ_{σ} — среднеквадратичное отклонение напряжения в поясе наветренной грани, σ_p — среднеквадратичное отклонение ветрового напора.

Для получения информации об изменении ветрового напора по отношению к двум взаимно перпендикулярным граням модуль вектора ветрового напора раскладывался на продольную и поперечную составляющие, которые определялись соответственно по формулам $P U = |p| \cdot \sin \alpha$ и $P V = p \cdot \cos \alpha$. Полученные графические изображения приведены на рис. 9. Результаты выполненных расчетов представлены на рис. 10.

Как оказалось, чувствительность башни в режиме резерва ветроагрегата снижается с увеличением скорости ветрового потока, т.к. уровень турбулентности тоже снижается (рис. 11), причем чувствительность башни в режиме генерирования электроэнергии гораздо ниже чувствительности в режиме резерва. Это может быть из-за того, что лопасти в режиме генери-

рования электроэнергии работают по принципу паруса.

Подобная информация об изменении чувствительности сооружения необходима при оценке нагрузочных режимов башни, а также при определении величины тянущей силы ротора.

Для **определения частоты собственных колебаний башни** выполнялся спектральный анализ сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье по 8192 точкам с применением спектрального окна Ханна, что позволило получить на спектрах разрешение, по частоте равное 0,008 Гц (рис. 12). Отличием энергетических спектров, соответствующих различным эксплуатационным режимам ВЭУ, является содержание спектральных максимумов на частотах 1,21 Гц и 3,64 Гц в режиме генерирования электроэнергии, что обусловлено работой ветроагрегата.

Отличия между значениями частот собственных колебаний башни, определенными численным и экспериментальным путем, составили 15% для первой формы колебания; 5% - для второй; до 1% - для третьей.

Для выявления причин возникновения резонанса в опорных раскосах было определено значение частоты их собственных колебаний путем применения метода «ручного» резонан-

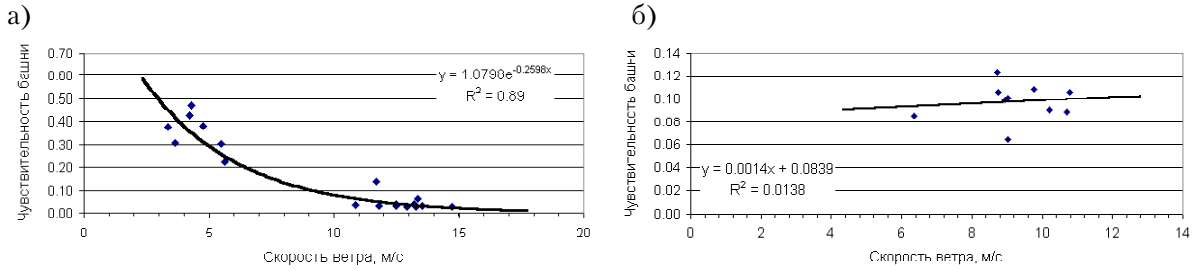


Рис. 10. Изменение чувствительности башни в режиме резерва (а) и рабочем режиме (б) ветроагрегата при изменении скорости ветра.

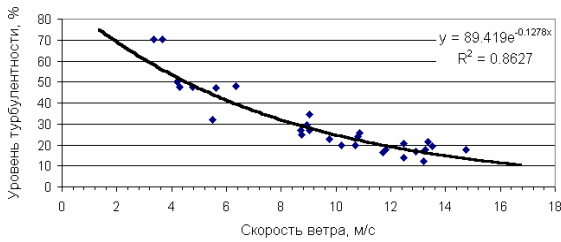


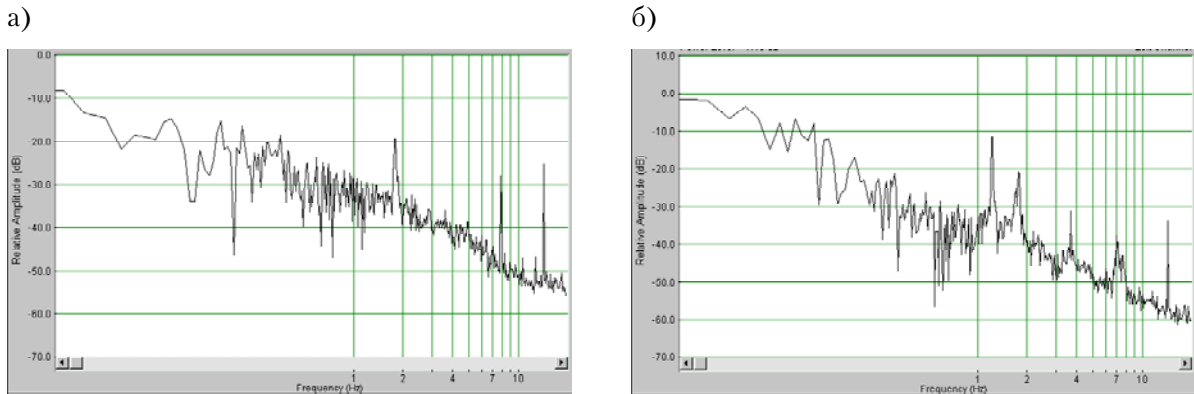
Рис. 11. Изменение турбулентности ветрового потока.

са. Пик на энергетическом спектре изменения напряжений в элементах (рис. 13) указывает на абсолютное значение искомого параметра. Величина 4,81 Гц практически совпадает со значением четвертой гармоники частоты вынужденных колебаний 1,21 Гц, что и объясняет периодическое увеличение амплитуды колебания раскосов в рабочем режиме ВЭУ. Следует отметить, что подобные явления практически невозможно учесть на этапе проектирования путем динамического анализа с исполь-

зованием универсальных вычислительных комплексов.

Применение метода **оценки взаимных корреляционных функций** изменения сигналов продольной составляющей ветрового напора и уровня напряжений в поясах наветренной грани башни согласно [7], позволило определить основные динамические параметры сооружения и построить его амплитудно-частотную характеристику (АЧХ).

После анализа графиков взаимных корреляционных функций (рис. 14), построенных для различных реализаций, были получены средние значения времени реакции конструкции на внешнее воздействие $\tau_0 = 5,3$ с, взаимной корреляционной функции $R_{\rho\sigma}(\tau_0) = 0,33$, логарифмического декремента колебания $\delta = 0,117$, коэффициента внутреннего трения $\gamma = 0,037$ и коэффициента динамичности для первой частоты собственных колебаний $\xi_{f_0} = 4,3$. Амплитудно-частотная характеристика колебания башни приведена на рис. 15 а.



Значение частот, Гц: 1,77; 7,76; 14,21

Значение частот, Гц: 1,21; 1,77; 3,64; 7,7; 14,21

Рис. 12. Энергетические спектры напряжений в поясах припорной зоны башни для режима резерва (а) и рабочего режима (б) ветроагрегата.

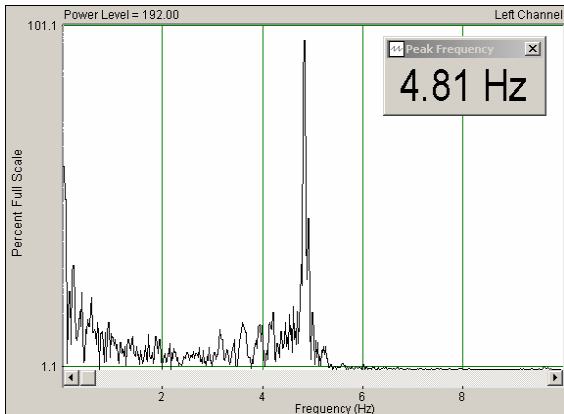


Рис. 13. Энергетический спектр изменения напряжений в опорном раскосе башни в режиме "ручного" резонанса.

Логарифмический декремент колебания опорных раскосов определялся путем анализа виброграмм (рис. 16) по формуле (4), согласно [8]

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right)}{n}, \quad (4)$$

где A_0, A_n – начальная и конечная амплитуды; n – количество периодов свободных затухающих колебаний. Его амплитудно-частотная характеристика приведена на рис. 15 б, значение коэффициента динамичности составило 21,7.

Дальнейшая эксплуатация башни без проведения каких-либо дополнительных мероприятий по ликвидации резонансных явлений в опорных раскосах является недопустимой, т.к. повлечет за собой интенсификацию процесса развития усталостных повреждений, ускорит процесс разболчивания конструкции и как результат приведет к преждевременному износу болтов в узлах и изменению динамического поведения башни. В качестве выхода

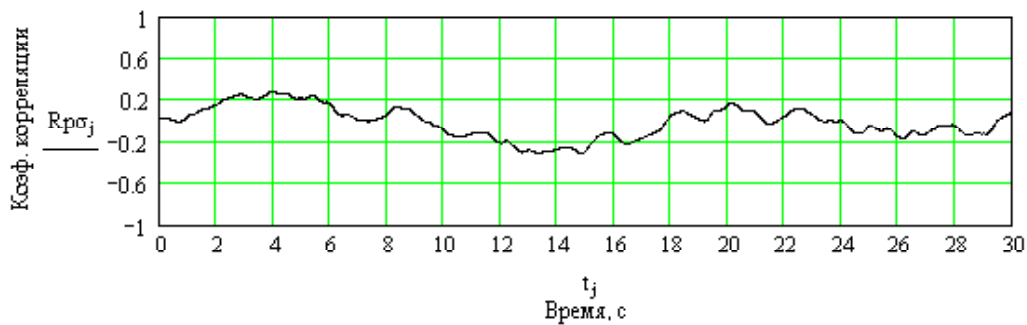


Рис. 14. Взаимно-корреляционная функция изменения напряжений в приопорной зоне поясов башни и ветрового напора.

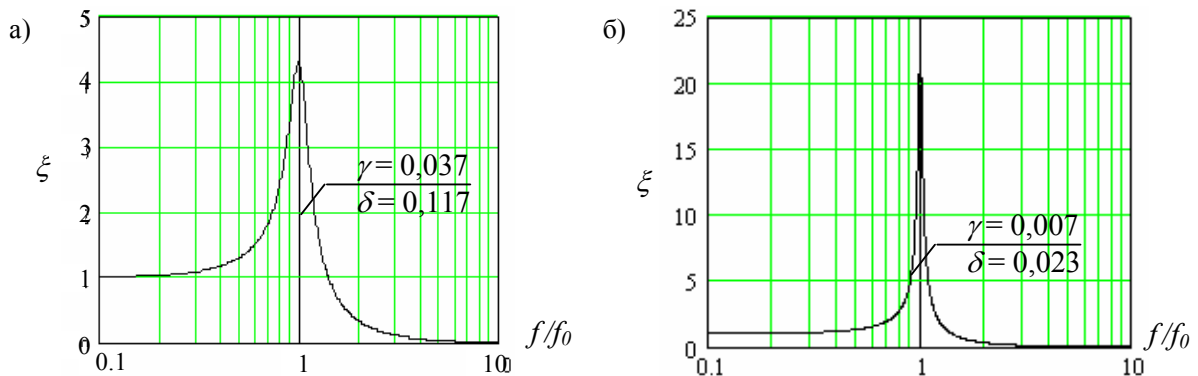


Рис. 15. АЧХ колебаний башни ВЭУ (а) и опорного раскоса (б) γ – коэффициент внутреннего трения, δ – логарифмический декремент колебаний, ξ – коэффициент динамичности, f – частота вынужденных и f_0 – собственных колебаний.

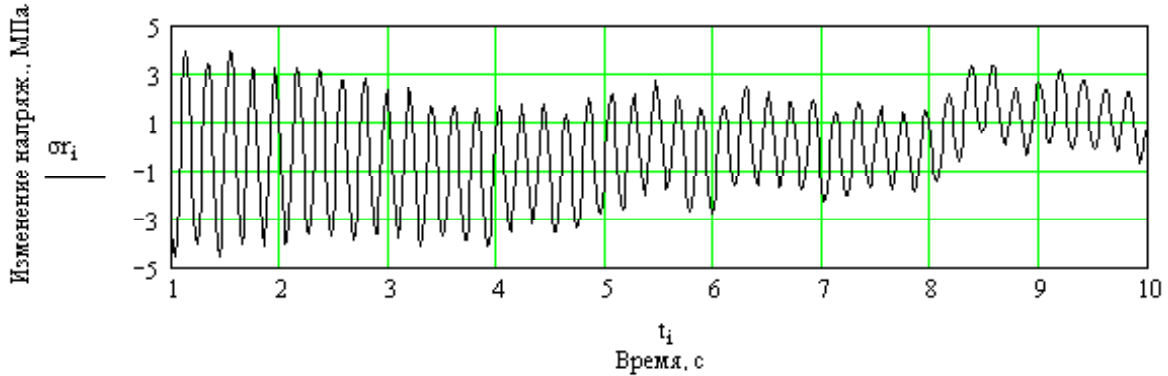


Рис. 16. График свободных затухающих колебаний опорного раскоса.

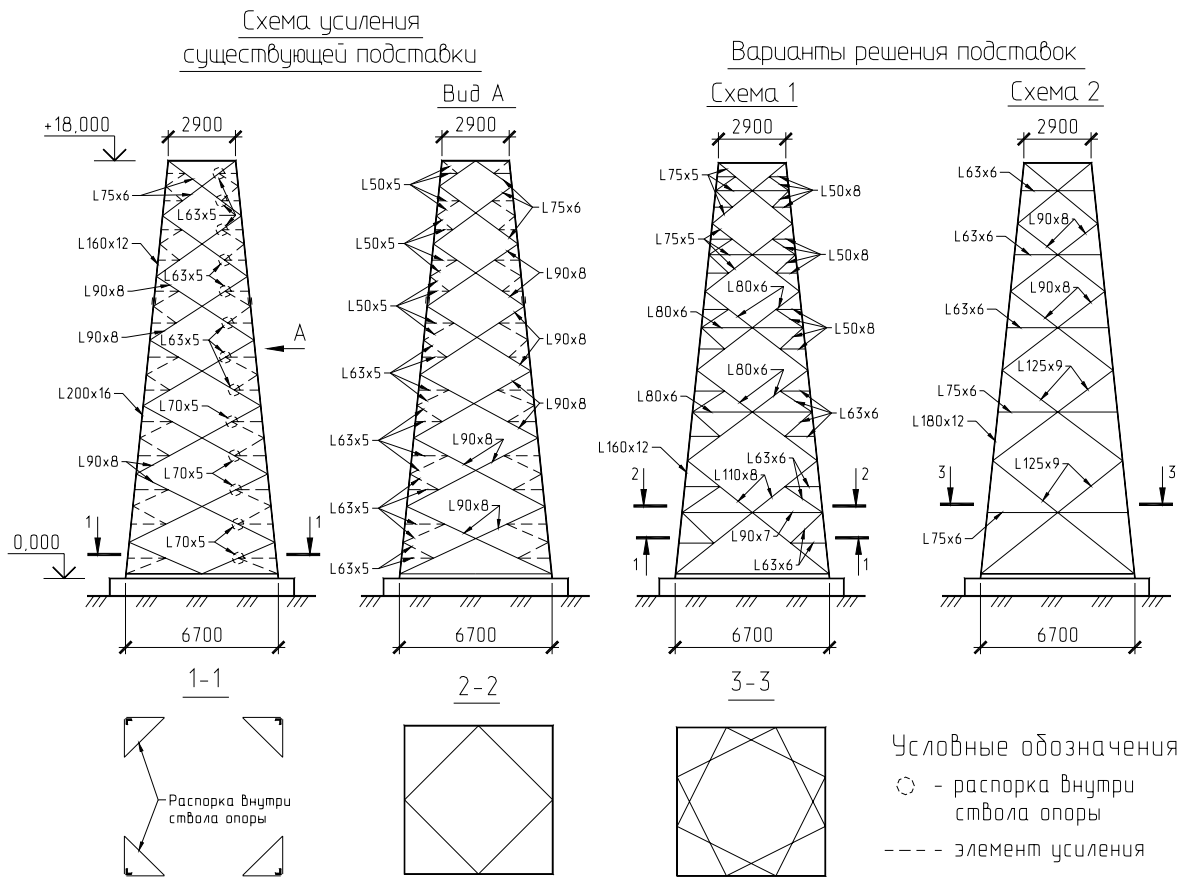


Рис. 17. Схема усиления существующей и варианты нового решения подставок под башню ВЭУ.

из сложившейся ситуации было предложено увеличить изгибную жесткость элементов решетки за счет постановки элементов шпренгеля (рис. 17). При этом частота колебания башни изменится не более чем на 8%, а расчетная частота колебания раскосов увеличится в ~1,5 раза, что является довольно прием-

лемым результатом. Были также запроектированы альтернативные варианты решения подставки под башню (рис. 17). Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 1, анализируя их можно заметить, что при практически одинаковой массе и значении частот собственных колебаний башни, с точки зрения

Таблица 1. Значения частот собственных колебаний башен ВЭУ различного исполнения.

Варианты конструктивного решения башни	Частота собственных колебаний соответствующая различным формам, Гц				Масса, т
	Первая	Вторая	Третья	Раскосы	
Запроектированная башня Н=36м	1,51÷3,73	7,38÷10,91	15,92	4,81	11,83
После усиления подставки	1,52÷3,74	7,44÷10,09	14,3	6,52	13,56
Подставка (Схема 1)	1,53÷3,45	6,86÷9,67	16,42	4,82	11,84
Подставка (Схема 2)	1,55÷3,48	6,97÷9,95	14,15	8,79	11,85

повышения жесткости решетки подставки, наиболее рациональной будет схема ее исполнения №2.

Выводы

В результате проделанной работы была доказана необходимость детального изучения динамического поведения башни ВЭУ. Причем на стадии проектирования нельзя пренебрегать учетом совместной работы башни с фундаментом и основанием, а также изменением жесткости узлов примыкания раскосов к поясам, которое может происходить в процессе эксплуатации конструкции. Доказана возможность представления ветроагрегата в расчетной схеме как дополнительная масса в узле оголовка башни без учета изменения его направления в процессе работы.

Проведенные экспериментальные исследования динамического поведения башни ВЭУ подтвердили правильность принятого подхода к определению частоты собственных колебаний сооружения на этапе проектирования, а также выявили необходимость проверки на условия возникновения локальных резонансов его конструктивных элементов. Также была запроектирована новая конструктивная форма башни ВЭУ с подставкой, у которой совмещенная решетка в двух смежных гранях и диафрагмы в каждой панели, что позволит предотвратить резонансные явления в элементах решетки.

При массовом применении башен нового конструктивного исполнения необходимо предварительное проведение их экспериментальных исследований и мониторинга динамического поведения, что позволит оценить соответствие реального поведения конструкции проекту.

Литература

1. Горохов Е.В., Турбин С.В., Бусько М.В. Определение оптимальной высоты башни ВЭУ // Сб. науч. трудов «Современные строительные конструкции из металла и древесины». — Одесса: ОГАСА. — 2003. — С. 70-77.
2. Germanisher Lloyd. Rules and Regulations. IV – Non Marine Technology. Part 1 – Wind Energy. Regulation for the Certification of Wind Energy Conversion Systems. Chapter 1-10. Supplement #1 to the 1993 Edition, March, 1994.
3. Некрасов Ю.П. Динамические воздействия ветра на металлические решетчатые башни ветроэнергетических установок. Дисс... канд. тех. наук: 05.23.01 / ДонГАСА. — Макеевка. — 2002. — 146 с.
4. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. Пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецовоной/ Под ред. Б.Е. Маслова. — М.: Стройиздат. — 1984. — 360 с.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов: Пер. с англ.. — М.: Мир. — 1971. — 408 с.
6. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР. — 1988. — 36 с.
7. Horokhov Ye.V., Nekrasov Yu.P., Turbin S.V., Vasilev V.N., Yugov A.M. The Monitoring of Wind Action on Towers of Wind Turbines // Proceedings of International IASS Symposium “Lightweight Structures in Civil Engineering – Contemporary Problems” June 24-28, Warsaw. 2002. — 514-518 pp.
8. Динамический расчет зданий и сооружений / М.Ф.Барштейн, В.А.Ильичев, Б.Г.Коренев и др.; Под ред. Б.Г.Коренева, И.М.Рабиновича. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1984. — 303 с.

Горохов Євген Васильович працює завідувачем кафедри "Металеві конструкції", ректором Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Президент Української асоціації з металевих конструкцій, закордонний член Російської академії будівництва, Академік Академії Вищої освіти та Академії будівництва України. Член Міжнародного комітету з вивчення впливу вітру на будівлі та споруди. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, кліматичні впливи на будівельні конструкції.

Бусько Максим Володимирович є асистентом кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. За сумісництвом займає посаду молодшого наукового співробітника "Спеціалізованого науково-виробничого центру конструкцій електромережевого будівництва" при ДонНАБА. Наукові інтереси: особливості вітрових впливів на вітроенергетичні установки, надійність башт ВЕУ.

Турбин Сергій Володимирович є доцентом кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Української асоціації з металевих конструкцій, Член робочих груп WG 16 "Метеорологія для повітряних ліній електропередачі" и WG 06 "Проектування повітряних ліній" комітету В2 "Повітряні лінії електропередачі" Міжнародного комітету по великих електроенергетичних системах (СІГРЕ). Наукові інтереси: ожеледні та вітрові навантаження та впливи на будівельні конструкції, надійність повітряних ліній електропередачі.

Горохов Евгений Васильевич является заведующим кафедрой "Металлические конструкции", ректором Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Президент Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, иностранный член Российской Академии строительства, Академик Академии Высшей школы и Академии строительства Украины. Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

Бусько Максим Владимирович является ассистентом кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. По совместительству занимает должность младшего научного сотрудника "Специализированного научно-производственного центра конструкций электросетевого строительства" при ДонНАСА. Научные интересы: особенности ветровых воздействий на ветроэнергетические установки, надежность башен ВЭУ.

Турбин Сергей Владимирович является доцентом кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, Член рабочих групп WG 16 "Метеорология для воздушных линий электропередачи" и WG 06 "Проектирование воздушных линий" комитета В2 "Воздушные линии электропередачи" Международного комитета по большим электроэнергетическим системам (СИГРЕ). Научные интересы: гололедные и ветровые нагрузки на строительные конструкции, надежность воздушных линий электропередачи.

Horokhov Evgeniy Vasil'evich is a Principal of Metal Structures department, rector of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a president of Ukrainian Association of Metal Construction. Foreign Member of Russian Building Academy, Member of High School and Building Academy of Ukraine. Member of International Working group in Wind Engineering. His research interests include the reliability of existing metal structures, climatic loads on buildings and structures.

Busko Maksim Vladimirovich is an assistant of Metal Structures department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a junior research officer of Scientific Industrial Center of Structures for Energy Construction of DonNASEA. His research interests include the wind loadings and influences on towers for wind turbines and reliability of the tower's structures.

Turbin Sergey Vladimirovich is a Docent of Metal Structures department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of Ukrainian Association of Metal Construction. Member of working group 16 "Meteorology for overhead lines", working group 06 "Principles of Overhead Line Design" of International Conference On Large High Voltage Electric System (SIGRE). His research interests include the icing and wind loadings in structural design and reliability of overhead lines.