

## РАЗМЕЩЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ НА ОТВЕТСТВЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТАХ

*Е.В. Соломин*

## PLACEMENT OF THE VERTICAL AXIS WIND TURBINES AT IMPORTANT ENGINEERING PROJECTS

*E.V. Solomin*

Дается описание методики вибробалансировки ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения

*Ключевые слова: ветроэнергетика, вибрации.*

The article describes the universal method of vibration balancing of vertical axis wind turbines.

*Keywords: wind-power engineering, vibration.*

Ветроэнергетика к началу XXI века выделилась в отдельную отрасль альтернативной энергетики на основе возобновляемых источников энергии. Несмотря на ряд очевидных неоспоримых достоинств, ветроэнергетические установки (ВЭУ) не лишены недостатков и в той или иной степени оказывают негативное влияние на окружающую среду. Основным источником такого влияния являются вибрационные колебания, генерируемые компонентами ветроэнергетической установки в процессе работы под действием возмущающих аэродинамических и инерционных сил и моментов. Особенно опасны резонансы возмущающих силовых воздействий и собственных колебаний компонентов ВЭУ, возникающие при дисбалансе ротора и приводящие к разрушению установки.

В связи с данными особенностями рядом стандартов и санитарных норм предписывается располагать ВЭУ на значительном удалении от жилых объектов, что приводит к повышению установочных и эксплуатационных расходов, а также к увеличению потерь при передаче энергии.

Вместе с тем, в связи с увеличением дефицита электроэнергии и роста цен на энергоносители количество запросов на размещение ВЭУ вблизи жилых, офисных и производственных зданий неуклонно растет. Более того, хаотичное размещение ВЭУ на кровле коттеджей принимает широкий размах. В связи с этим исследование взаимодействия системы «ВЭУ-здание» превращается в одну из основных исследовательских и конструкторских задач.

Силами ученых кафедры электротехники ЮУрГУ и ООО «ГРЦ-Вертикаль» за период 2002-2010 гг. был создан ряд ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения (рис. 1), отличающихся повышенным аэродинамическим КПД или коэффициентом использования энергии ветра (до 38 %), аэродинамической стабилизацией скорости вращения, надежностью эксплуатации и пониженными вибрационными характеристиками.

Особенностью вертикально-осевых ветроустановок является то, что их работа не зависит от направления ветра и поэтому их производительность

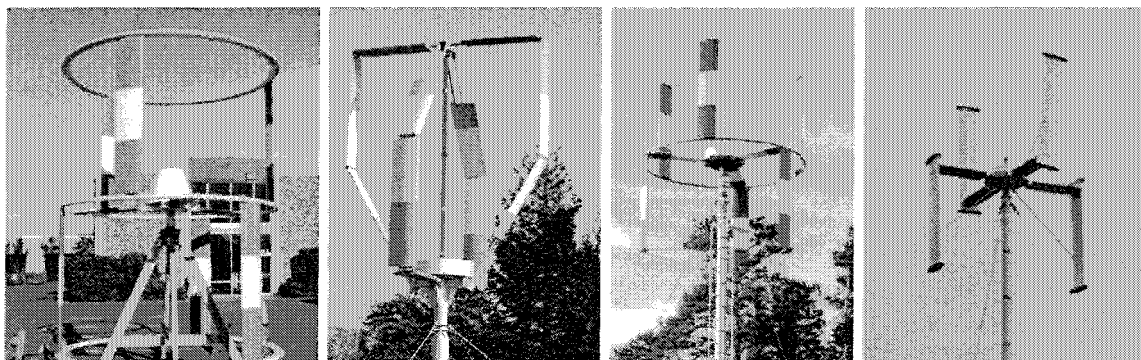


Рис. 1. Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения

# Инженерное оборудование зданий и сооружений

в целом выше, чем у горизонтально-осевых. Однако при вертикальном расположении оси вращения встает другая проблема, связанная с механическим ослаблением компонентов (или люфтом), которое будет проявляться в спектре вибрации всегда в той или иной степени. Причина этого явления проста - в агрегате с горизонтальным валом ротор прижат к подшипнику собственным весом, что является стабилизирующим фактором, требующим для возбуждения вибраций значительной возбуждающей силы, соизмеримой с весом ротора. При вертикальном расположении ротора - агрегата для возбуждения вибраций - достаточно небольших усилий. Этот недостаток в основном и является той причиной, по которой вертикально-осевые ветроустановки не нашли своего должного применения. Решение этой проблемы предложено в настоящей статье.

Процесс исследования на основе практического эксперимента является чрезвычайно дорогостоящим. Поэтому, учитывая мощное развитие микропроцессорной техники и основанных на ней математических аппаратов, одним из путей изучения параметров ветроэнергетических установок является компьютерное моделирование, а также всесторонний анализ физико-математических моделей с проведением соответствующих экспериментов.

Предметом исследования вибраций являлась ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения ВЭУ-3 (рис. 2), а также ее компьютерная (трехмерная) и математическая (функциональная) модели. Малая мощность 3 кВт была выбрана на предмет изучения, так как в условиях города или поселка размещение крупных установок чрезвычайно затруднено в силу ряда обстоятельств (дефицит площадей, недостаточная проч-

ность зданий и сооружений, ограничения по технике безопасности и т. д.).

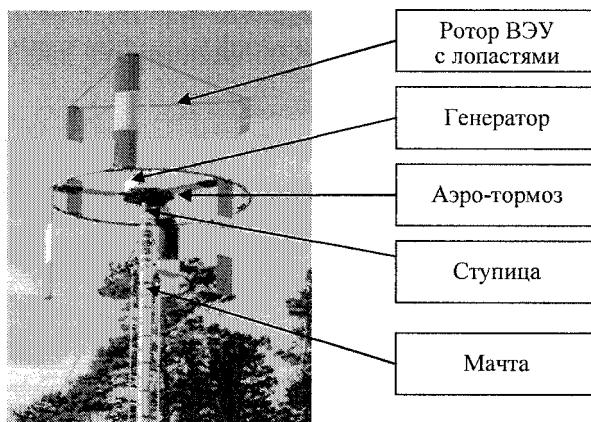


Рис. 2. Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка ВЭУ-3(6) производства ООО «ГРЦ-Вертикаль», мощность 3 кВт

Анализ параметров ВЭУ, негативно влияющих на окружающую среду и здоровье человека приводит к следующему выводу: основным источником возникновения негативных процессов являются вибрации, возникающие в результате действия и взаимовлияния ряда физических процессов, происходящих в процессе работы ВЭУ.

Таким образом, основная задача уменьшения влияния основных и производных негативных параметров на окружающую среду заключается в снижении вибраций до уровня, определенного стандартами и нормами, при этом гарантирующего отсутствие возможности возникновения производных негативных процессов. Данная задача реализуется с помощью определенной последовательности действий (рис. 3).

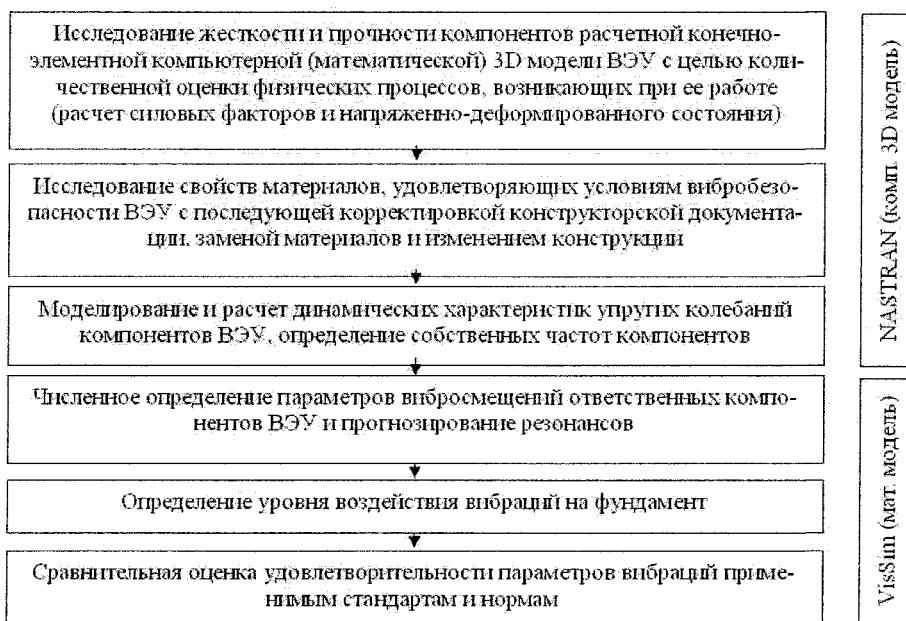


Рис. 3. Последовательность действий для обеспечения вибробезопасности ВЭУ

Задача обеспечения вибробезопасности ВЭУ распадается на последовательное проведение двух теоретических и одной экспериментальной процедур с дальнейшим анализом параметров ВЭУ на удовлетворительность соответствующим стандартам и нормам. Оценка влияния вибрации на человека проводится согласно СН 2.2.4/2.1.8.566-96. При размещении ВЭУ в непосредственной близости к среде обитания человека общая вибрация (амплитуда виброускорения,  $\text{м/с}^2$ ) не должна превышать критического уровня  $0,004 \text{ м/с}^2$ .

Теоретические исследования заключаются в следующем:

- на основе трехмерной (3D) компьютерной модели, построенной в программном комплексе NASTRAN, определить методом конечных элементов свойства компонентов исследуемой ВЭУ, вычислить частоты собственных колебаний компонентов, оптимизировать конфигурацию ротора, провести подбор удовлетворительных материалов с целью максимального снижения вибраций;

- на основе математической функциональной модели, построенной в программной среде VisSim, провести анализ воздействия внешних аэродинамических и центробежных сил и моментов на ВЭУ, выявить возможные резонансы и провести оптимизацию конструкции за счет регулирования жесткости элементов с целью смещения резонансных явлений в безопасные частоты.

Построение моделей проведено с рядом допущений, не оказывающих существенного влияния на конечный результат (ламинарность и устойчивость давления и направления ветрового потока, однородность материалов и т. д.).

Расчет силовых факторов и напряженно-деформированного состояния компонентов ВЭУ проведено в программном комплексе NASTRAN (рис. 4).

Собственные частоты колебаний ротора вычислены во всем диапазоне его вращения, от 0 до 180 об/мин и в основном определяются жесткостными характеристиками основания ротора и его моментом инерции.

В процессе проведения анализа напряженно-деформированного состояния компонентов ВЭУ была изменена конфигурация ротора (рис. 5) со смещением ступицы из нижнего положения (известная конструкция ВЭУ, произведенная в США и генерирующая высокий уровень вибраций) в среднее между ярусами (новая конструкция, со значительно меньшим уровнем вибраций). В процессе расчетов откорректирована конструкторская документация и упругие откосы заменены на тросовые растяжки.

На основании данных, полученных в результате исследования компьютерной трехмерной модели в программном комплексе NASTRAN проведен дальнейший анализ математической модели, построенной в среде визуального моделирования

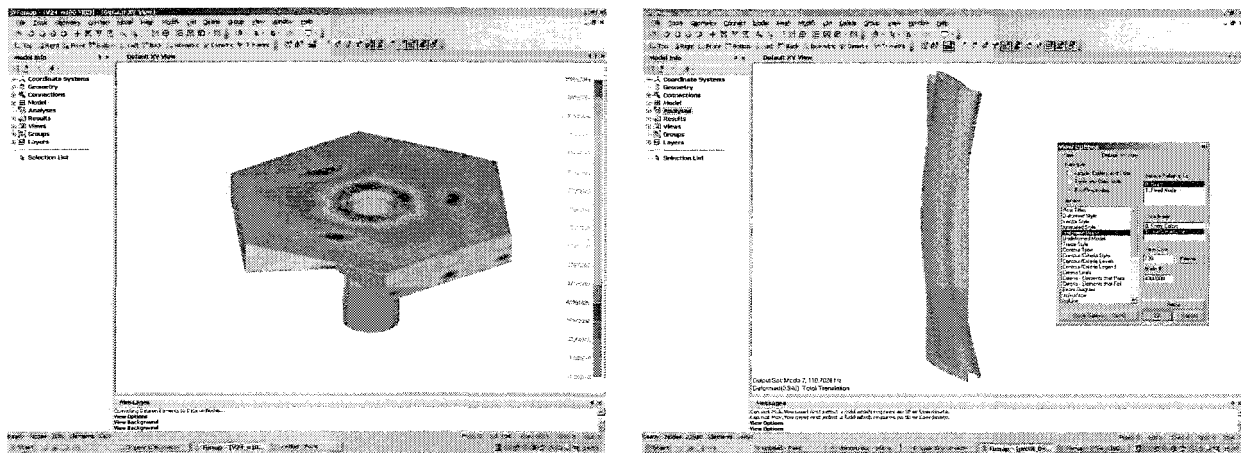


Рис. 4. Конечно-элементные модели ступицы ротора и лопасти ВЭУ в NASTRAN (показаны примеры состояний)

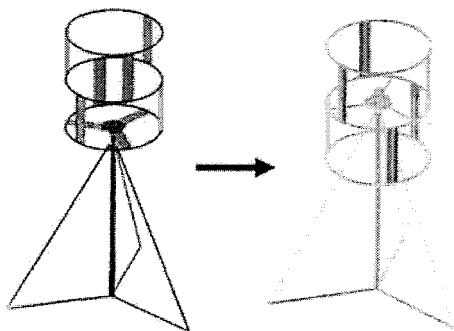


Рис. 5. Изменение конструкции в процессе исследования

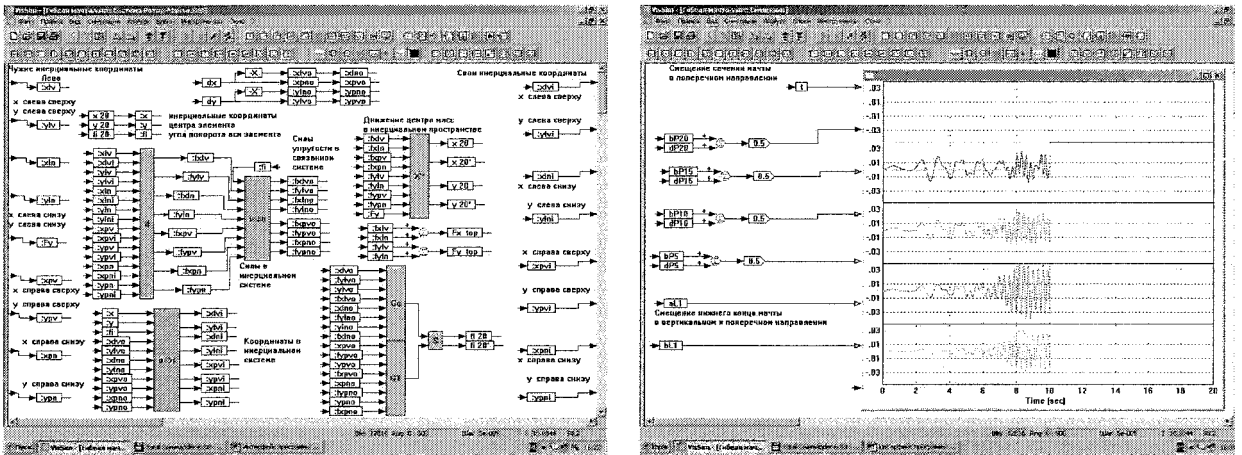


Рис. 6. Пример интерфейса среды VisSim и содержание функциональных блоков

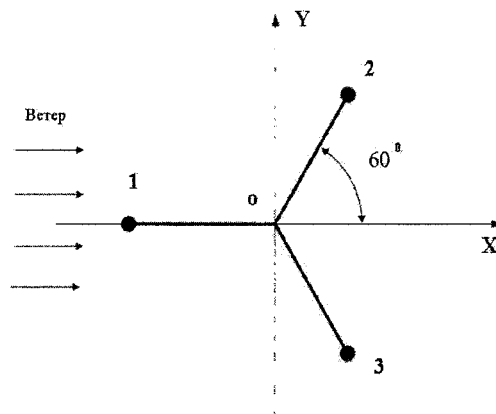


Рис. 7. Схема воздействия ветра на ВЭУ и размещения крепления растяжек мачты ВЭУ

VisSim на предмет возникновения резонансов колебаний компонентов конструкции с учетом того, что основными факторами, вызывающими вибрации ВЭУ, передающиеся на фундамент, являются:

- аэродинамические силы, действующие на ротор ветроколеса;
- аэродинамические моменты, действующие на ротор ветроколеса;
- периодические инерционные моменты, обусловленные наличием у ротора не нулевых центробежных моментов инерции;
- периодические инерционные силы, обусловленные смещением центра масс ротора от оси вращения.

В созданной программе «Ротор - гибкая мачта» формульные зависимости представлены в виде структурных схем, что обеспечивает наглядность и лучшее восприятие связей между переменными задачи (рис. 6).

Моделирование силового воздействия ВЭУ на фундамент по схеме, изображенной на рис. 7, проведено при различных скоростях вращения ротора при условии воздействия наиболее сильного вероятного ветра на территории России 12 и 16 м/с. В процессе моделирования предполагалось, что ротор ВЭУ на выбеге проходит все возможные частоты враще-

ния под аэродинамической нагрузкой. Начальная частота вращения ротора задавалась 280 об/мин, что изначально превышает максимальную скорость вращения ротора ВЭУ (180 об/мин), стабилизируемую на практике за счет аэродинамических тормозов. На основании исследований модели ВЭУ получены зависимости колебаний сил и моментов, частотные спектры и вибросмещения компонентов. Пример колебательных законов вибросмещений показан на рис. 8.

Анализ силовых воздействий проведен способом разложения действующих негармонических колебаний сил, моментов и вибросмещений в ряд Фурье с получением соответствующих спектров частот. На основании спектрального анализа сделаны выводы, на каких частотах вращения ротора ВЭУ ожидается резонанс, получена его амплитуда и преобладающие частоты.

Из анализа полученных данных следует, что резонанс колебаний элементов ВЭУ (например, мачты) может вызываться как дисбалансом массы ротора, так и действием переменных аэродинамических сил. Снижение действия аэродинамического возмущения может быть осуществлено с помощью варьирования жесткостью мачты. При этом резонансы, вызываемые аэродинамическими си-

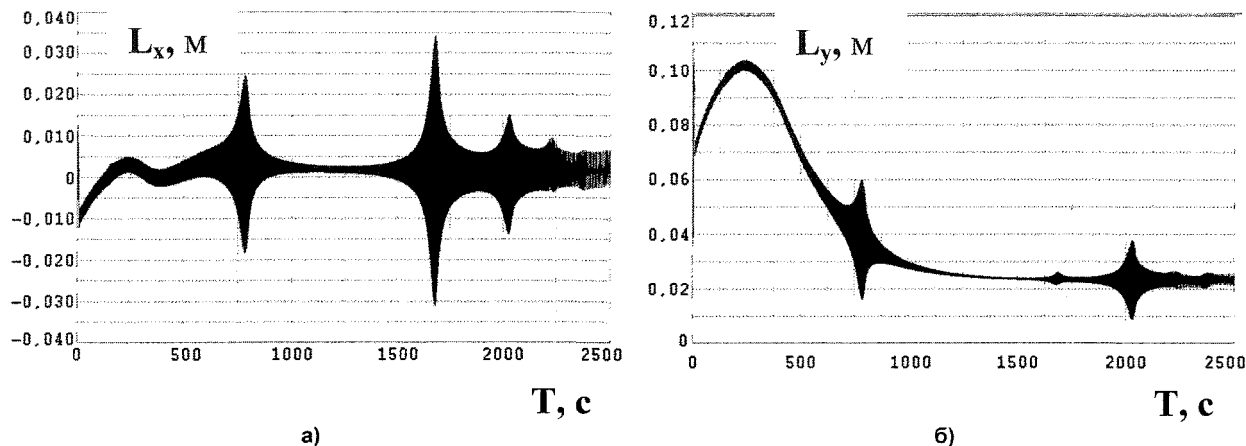


Рис. 8. Смещение верхнего (а) и нижнего (б) конца мачты в горизонтальном направлении соответственно по осям  $OX L_x$  и  $OY L_y$  в зависимости от времени (показано в виде колебательного закона)

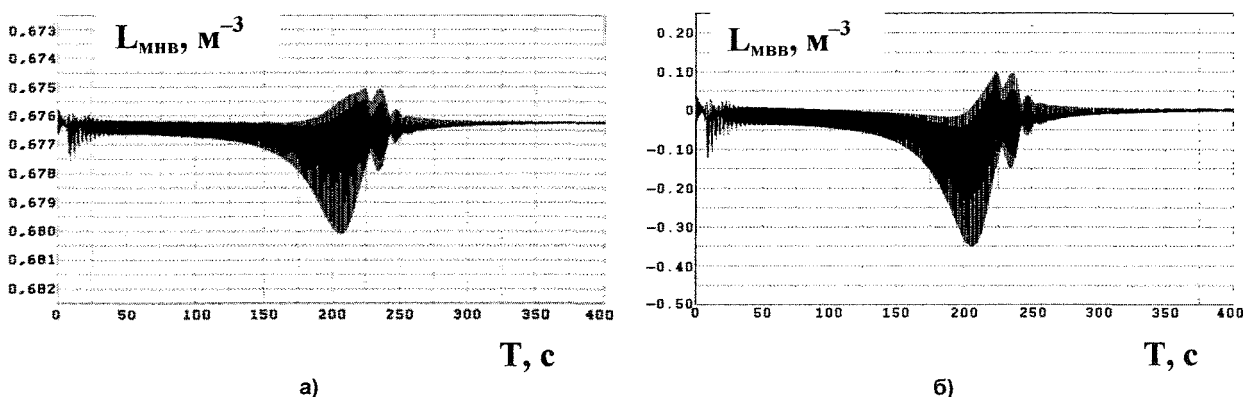


Рис. 9. Смещение  $L_{mnb}$  нижней (а) и  $L_{mbv}$  верхней (б) точек мачты в месте крепления соответственно к фундаменту и ступице в вертикальном направлении (мм) в зависимости от времени  $T$  (с)

лами, можно снизить до уровня, не требующего внимания, либо увести их в зону безопасных частот. Жесткость мачты определяется натяжением растяжек. Данный подход к определению резонансных частот дает возможность определения параметров комплектующих, удовлетворяющих условиям эксплуатации в составе ВЭУ. В результате варьирования материалом и жесткостью была применена мачта с низкой частотой собственных колебаний до 1 Гц. Это не исключило резонансов, но перевело их в область низких скоростей вращения ротора ветроколеса, что уменьшило нагрузки на растяжки и фундамент и сделало резонансные явления безопасными.

Таким образом, путем подбора материала мачты, а также диаметра и натяжения выпускаемых промышленностью тросов и многократного прогона математической модели в среде VisSim получено оптимальное соотношение параметров ротора и мачты.

Исследование вертикальных воздействий (в том числе вибро смещения упругой мачты) позволяет оценить воздействие ВЭУ на фундамент и мачты ВЭУ на ступицу (рис. 9). Вертикальное вибро смещение определяет вибрационную нагрузку на

фундамент и может служить начальной характеристикой для расчета влияния ВЭУ на конструкцию фундамента, а значит, и анализа воздействия вибрационных и шумовых колебаний на окружающую среду. В частности, при наличии вертикальных вибро смещений с частотой, совпадающей с собственной частотой фундамента (сооружения), необходим дальнейший анализ возможности размещения ВЭУ на данном фундаменте (сооружении) или грунте. Таким образом, на основе анализа вибро смещений и спектров силового воздействия с целью их регулирования (уменьшения, перехода в другие частоты) были выработаны рекомендации конструкторам по применению материалов компонентов ВЭУ, а также их размерам и архитектуре конструкции, которые позволят свести к минимуму уровень вибраций ВЭУ, вызываемых возмущающими аэродинамическими силами. Кроме этого, результаты вибрационных исследований могут служить базой для расчетов на удовлетворительность сооружений для размещения на них такого вибро динамического объекта, как ветроэнергетическая установка. Анализ вибро воздействий проводится на соответствие действующим стандартам и нормативам.