

05.26.01
С605

Контрольный
На правах рукописи

Соломин Евгений Викторович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИБРОБЕЗОПАСНОСТИ
ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» на кафедре «Электротехника».

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
И.М. Киричникова.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
В.Ф. Бухтояров;
доктор технических наук, профессор
Л.А. Саплин.

Ведущее предприятие — ГОУ ВПО «Уральский государственный
технический университет» (УГТУ-УПИ),
г. Екатеринбург.

Защита состоится 26 февраля 2009 г., в 12.00 часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «__» января 2009 года.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел/факс: (351) 264-7694, e-mail: nii-uramet@mail.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин.

Актуальность работы. К началу XXI века ветроэнергетика 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. Эти вибрации, передаваясь через среду, воздействуют на близлежащие здания и сооружения, снижают их прочность и устойчивость, могут стать причиной разрушения трубопроводов, подземных коммуникаций и других окружающих инженерных сооружений. Под действием вибрации происходит эрозия почвы, переселение животных и птиц, наблюдается ухудшение самочувствия людей, проживающих за многие километры от места расположения ветроустановки.

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.

Учитывая эту тенденцию и недостаточную изученность вибрационных свойств выпускаемых промышленностью ветроустановок, особенно с вертикальной осью вращения, разработка методов снижения вредного и, в ряде случаев, опасного воздействия общей вибрации, генерируемой ВЭУ, является актуальной и приобретает особое значение. При этом одной из главных задач остается обеспечение максимальной безопасности ВЭУ с точки зрения воздействия вибрации на объекты.

Работа выполнена в соответствии с федеральной целевой программой "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы" (Постановление от 17 октября 2006 г. № 613 «О федеральной целевой программе»), код Н4.4. Энергетика, включая нетрадиционную. Область техники Н02N. Критическая технология федерального уровня «Технологии новых и возобновляемых источников энергии».

Работа дважды поддержана грантами по программе финансирования гражданских научно-исследовательских работ оборонного комплекса России, осуществляемой Международным научно-техническим центром, г. Москва.

Цель работы – снижение общих вибраций вертикально-осевой ветроэнергетической установки.

Идея работы – разработка методики снижения общих вибраций ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки за счет оптимизации конструкторских решений и весовой балансировки ротора в предэксплуатационный период.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Общая вибрация ветроустановки, вызываемая внешними возмущающими аэродинамическими и центробежными силами и моментами, зависит от геометрии и свойств материалов компонентов ротора и мачты. Эти параметры можно оптимизировать на этапе проведения конструкторских работ с целью снижения вибраций до допустимого уровня.

2. Вибрации в роторе исправной ветроустановки возникают за счет его дисбаланса, вызванного неоднородностью материалов компонентов и погрешностями сборки. Дисбаланс ротора устраняется за счет весовой балансировки.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований общих вибрационных колебаний ВЭУ, проведенных на основе компьютерных математических и физической моделей с целью снижения этих вибраций.

4. Метод балансировки ротора вертикально-осевой ВЭУ в предэксплуатационный период.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ физики, удовлетворительным совпадением результатов теоретических исследований вибраций, генерируемых ветроустановкой, с результатами экспериментов, выполненных в реальных условиях.

Значение работы.

Научное значение работы заключается в том, что

– установлено влияние внешних и внутренних силовых воздействий, приводящих к возникновению вибрации;

– определена величина и законы изменения вибраций;

– разработан метод снижения уровня вибраций на основе моделирования параметров и архитектуры компонентов в период проектирования.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– на основе теоретических исследований, опыта производства и эксплуатации ветроэнергетических установок создана методика динамической балансировки роторов вертикально-осевых ветроэнергетических установок малой мощности (1...100 кВт), рекомендуемая к использованию производителями ВЭУ в предэксплуатационный период с целью снижения вредного влияния ВЭУ на здоровье человека и внешнюю среду;

– в соответствии с полученными результатами исследований и испытаний предложены изменения в существующие стандарты по применению ВЭУ.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Научные положения и выводы переданы в ООО «ГРЦ-Вертикаль» и ОАО «КумАПП» и используются на этапе проведения конструкторских работ и в процессе предэксплуатационной балансировки роторов выпускаемых ветроэнергетических установок для снижения вибраций. Уровень вибраций после балансировки роторов находится в допустимых пределах.

В настоящее время на испытаниях и в эксплуатации находятся:

– ВЭУ-1	– Окланд (Калифорния, США)	1 шт.;
(1 кВт, четырехлопастная):	– Ронерт Парк (Калифорния, США)	1 шт.;
	– Кумертау (Башкирия)	1 шт.;
	– Миасс (Челябинская область)	2 шт.;
– ВЭУ-3(6)	– Кумертау (Башкирия)	1 шт.;
(3 кВт, шестилопастная):	– Ронерт Парк (Калифорния, США)	1 шт.;
	– Челябинск	1 шт.;
– ВЭУ-3(4)	– Кумертау (Башкирия)	1 шт.
(3 кВт, четырехлопастная):		

Рекомендации и проекты изменений ГОСТов и стандартов организаций были переданы в НПЦ Малой Энергетики ОАО РАО «ЕЭС России».

Апробация работы: Разработки награждены дипломом «Второго регионального конкурса творческой мысли «От идеи до проекта»» за разработку проекта «Организация специализированного участка по изготовлению серийных ветроустановок», г. Екатеринбург, 2003 г., дипломом Министерства образования и науки Российской Федерации, Федеральным Агентством по науке Российской Федерации за участие в выставке «Перспективные технологии XXI века», г. Москва, 2004 г., дипломом «Выдающегося разработчика ветровых турбин с вертикальной осью вращения» Научно-производственной группы МК Стил по программе профессиональной разработки и науки, Калифорния, США, 2007 г., дипломом «За активное участие в областном конкурсе «Изобретатель Южного Урала», г. Челябинск, 2008 г., серебряной медалью VIII Московского международного салона инноваций и инвестиций за разработку «Ветроэнергетическая установка», г. Москва, 2008 г.

Разработки получили положительную оценку:

– на НТС Министерства сельского хозяйства Челябинской области, г. Челябинск, 2005 г.;

– на НТС ОАО РАО «ЕЭС России» секция «Малая и нетрадиционная энергетика», г. Москва, 2006 г.

Результаты разработок одобрены Департаментом топливно-энергетического комплекса Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации, г. Москва, 2006 г.

Результаты работы были доложены, рассмотрены и одобрены:

– на научно-практической конференции ЮУрГУ, секция «Возобновляемые источники энергии», г. Челябинск, 2008 г.;

– на V Международной научно-практической конференции «Возобновляемые источники энергии. Ресурсы. Системы энергогенерирования на возобновляемых источниках энергии», г. Москва, 2008 г.;

– на 1-й Международной научно-практической конференции «Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: экономика, экология, опыт применения» и круглом столе в честь 85-летия Бурятии «Приоритеты Байкальского региона в азиатской геополитике России», г. Улан-Удэ, 2008 г.;

– на Российско-чешском энергетическом семинаре «Энергосбережение и проблемы энергетики», г. Челябинск, 2008 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 1 патент и 1 положительное решение на выдачу патента и 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 259 страницах машинописного текста, содержит 49 страниц приложений, 126 рисунков, 27 таблиц, список используемой литературы из 208 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, основная идея и научные положения, выносимые на защиту, отмечена научная значимость и практическая ценность работы.

Использование альтернативной возобновляемой энергетики в условиях растущего дефицита электроэнергии и цен на энергоносители, бесспорно, приносит пользу человечеству с экологической и экономической точек зрения, поэтому сегодня ветроэнергетика в ряде стран уверенно конкурирует с традиционными источниками энергии. Российская наука XXI века также располагает рядом уникальных исследований и разработок, которые со временем, несомненно, выведут Россию на передовые рубежи альтернативной энергетики (Н.Е. Жуковский, В.П. Ветчинкин, Г.Х. Сабинин, В.Р. Вашкевич, Е.М. Фатеев, В.Н. Андриянов, П.П. Безруких, Д.Н. Быстрицкий, Я.Б. Данилевич, Г.И. Денисенко, В.А. Минин, Е.И. Куклин, М.В. Кузнецов, Л.А. Саплин, В.В. Елистратов, В.И. Виссарионов, В.В. Харитонов, Я.И. Шефтер и др.).

Однако внедрение ветроэнергетических установок, и особенно ветропарков, требует соблюдения определенных мер техники безопасности. Учитывая тот факт, что ветроустановки являются источниками повышенной вибрации, процесс внедрения ветроэнергетики требует детального изучения и контроля параметров ВЭУ, в особенности, когда ветроустановки располагаются в непосредственной близости к жилым, офисным или производственным зданиям. Кроме того, необходимо изучение параметров ВЭУ и с точки зрения соответствия действующим ГОСТ, СНиП и другим регулирующим документам, в том числе с целью корректировки существующих стандартов и норм.

Внедрение ветроэнергетических установок и ветропарков является частью технического прогресса, нуждающегося в глубоком изучении, анализе и

прогнозировании с целью соблюдения всех применимых мер охраны труда. Следовательно, изучение поведения компонентов установки под воздействием возмущений, исследование вибрационных параметров ВЭУ, прогнозирование резонансных явлений, приводящих к негативным последствиям, и снижение вибрационных колебаний являются приоритетными задачами ветроэнергетики.

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 диссертационной работы является ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения ВЭУ-3, а также ее компьютерная (трехмерная) и математическая (функциональная) модели. Малая мощность 3 кВт выбрана на предмет изучения, так как в условиях города или поселка размещение крупных установок чрезвычайно затруднено в силу ряда обстоятельств (дефицит площадей, недостаточная прочность зданий и сооружений, ограничения по технике безопасности и т.д.).

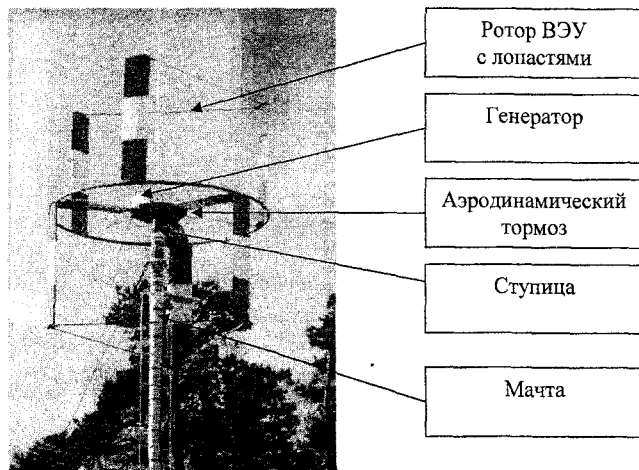


Рис. 1. Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка ВЭУ-3(6) производства ООО «ГРЦ-Вертикаль», мощность 3 кВт

Особенностью вертикально-осевых ветроустановок является то, что их работа не зависит от направления ветра и поэтому их производительность 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 отражено в настоящей диссертации.



Рис. 2. Параметры работающей ветроэнергетической установки (ВЭУ), негативно влияющие на окружающую среду, здоровье и самочувствие человека

В процессе работы исправная ветроэнергетическая установка генерирует спектр механических, электромагнитных, звуковых колебаний (рис. 2):

– Вибрации образуются в процессе работы ветроэнергетической установки за счет действия внешних возмущающих силовых воздействий, внутреннего взаимовлияния компонентов друг на друга, дисбалансов вращающихся деталей, а также изгибных колебаний лопастей и мачты за счет действия знакопеременных сил. При совпадении гармоник колебаний возмущающих воздействий с гармониками собственных колебаний компонентов и/или отклика системы компонентов возможны резонансы;

– Механический шум компонентов появляется в основном в процессе работы мультипликатора (коробки передач) и подшипников. В изучаемой установке применен тихоходный генератор на постоянных магнитах с осевым зазором без мультипликатора, что позволило исключить вибрацию в этом узле;

– Аэродинамический шум появляется в связи с давлением и трением набегающего потока об элементы ВЭУ, в основном лопасти и траверсы;

– Аэродинамический ультразвук может генерироваться малыми и/или тонкими элементами ВЭУ, например, растяжками, кронштейнами, фиксаторами болтовых соединений, фрагментами тел насекомых и т.д.;

– Электромагнитные колебания появляются при вращении обмоток генератора в магнитном поле и возникновении электродвижущей силы в обмотках;

– Аэродинамический инфразвук появляется за счет срыва потока с лопастей, турбулентности ветрового потока за ВЭУ. У вертикально-осевых установок этот параметр не проявляется в связи с конфигурацией ротора;

– Механический инфразвук образуется в процессе появления гармоник при работе вращающихся частей ступицы ветроустановки за счет неидеальности трущихся поверхностей, явных и скрытых дефектов и дисбалансов.

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.



Рис. 3. Последовательность действий в обеспечении вибробезопасности 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).

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, m/c^2) не должна превышать критического уровня $0,004 m/c^2$.

Обеспечение вибробезопасности ВЭУ проводится согласно ГОСТ 26568-85 «Вибрация. Методы и средства защиты» по схеме, показанной на рис. 4.

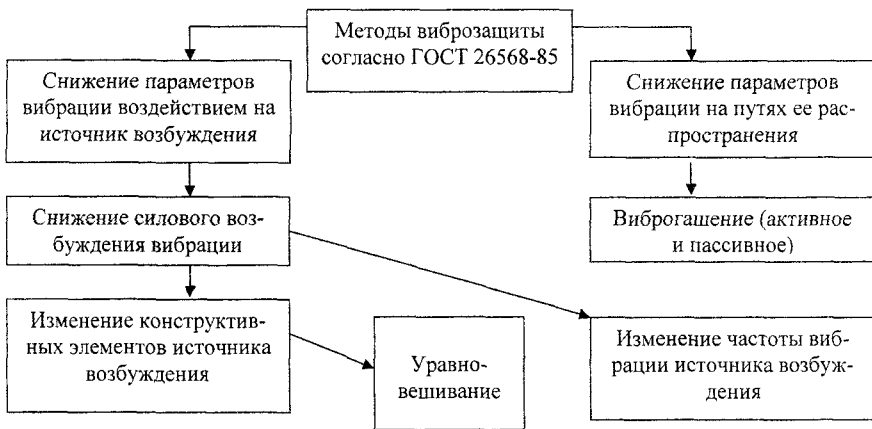


Рис. 4. Схема снижения вибраций согласно ГОСТ 26568-85

Теоретические исследования заключаются в следующем (рис. 5):

- 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.

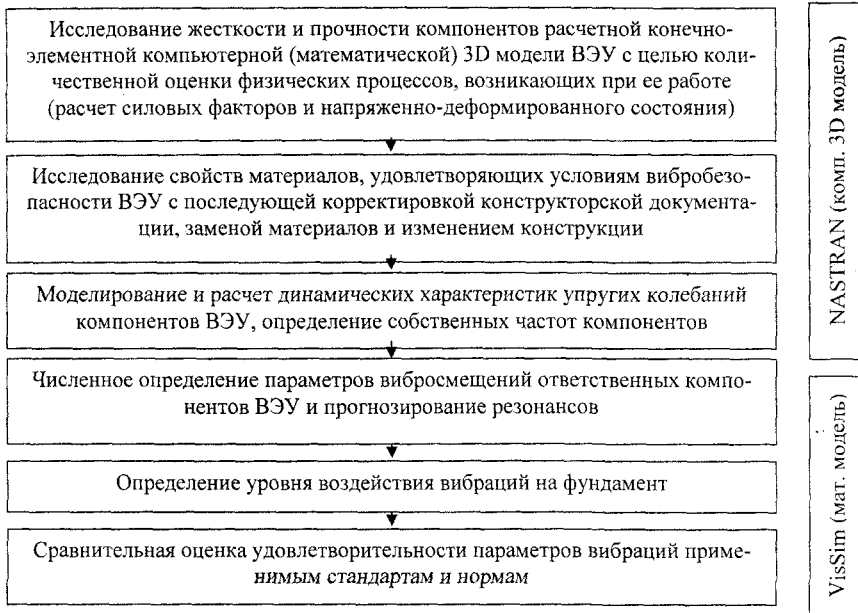


Рис. 5. Последовательность проведения теоретических исследований

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 проведен в программном комплексе NASTRAN (рис. 6).

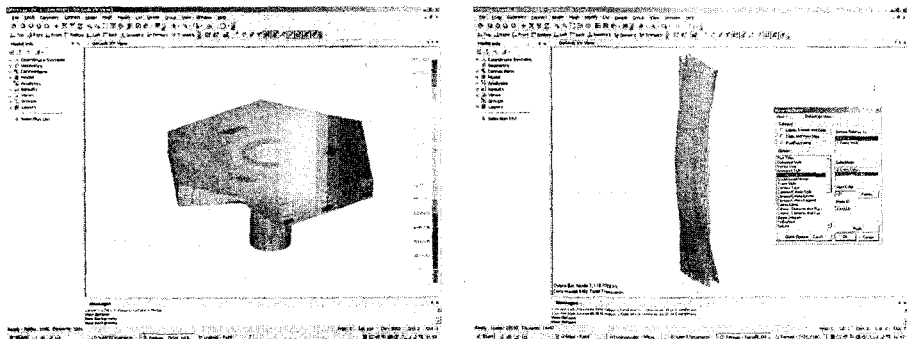


Рис. 6. Конечно-элементные модели ступицы ротора и лопасти ВЭУ в NASTRAN (показаны примеры состояний)

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. 7) 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 основе расчета воздействия на ВЭУ возмущающих силовых факторов и внутренне-напряженно-деформированного состояния выделены собственные частоты и формы основных тонов упругих колебаний, определяющих поперечную динамику ВЭУ (рис. 8).

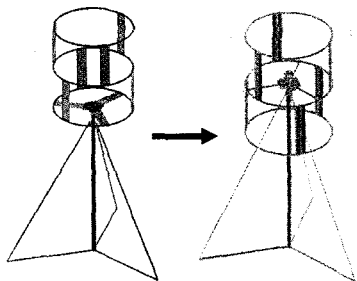


Рис. 7. Изменение конструкции в процессе исследования

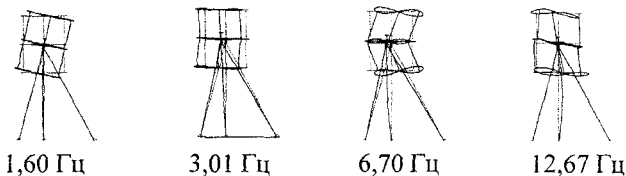


Рис. 8. Формы основных тонов упругих поперечных колебаний ВЭУ

На основании данных, полученных в результате исследования компьютерной трехмерной модели в программном комплексе NASTRAN проведен дальнейший анализ математической модели, построенной в среде визуального моделирования 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. 9).

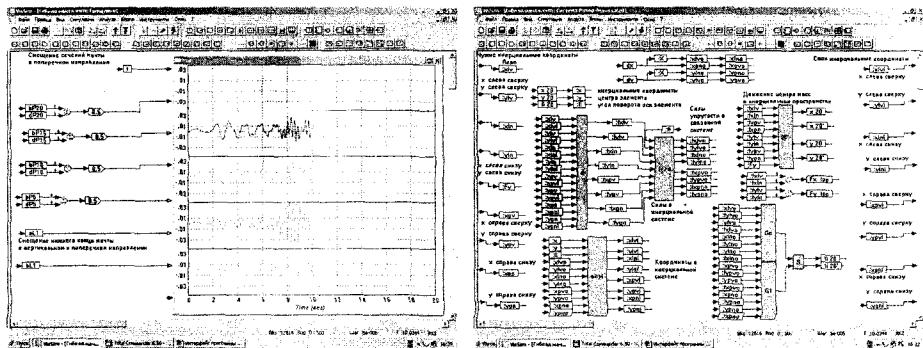


Рис. 9. Пример интерфейса среды VisSim и содержание функциональных блоков

Моделирование силового воздействия ВЭУ на фундамент по схеме, изображенной на рис. 10, 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

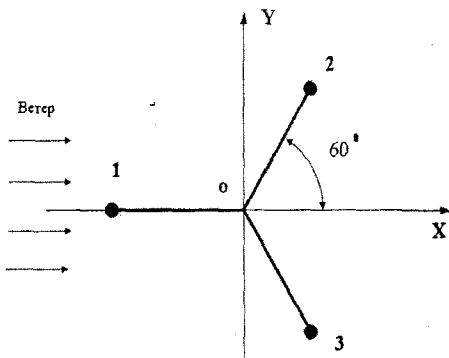


Рис. 10. Схема воздействия ветра на ВЭУ и раз-
мещения крепления растяжек мачты ВЭУ

на выбеге проходит все возможные частоты вращения 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. 11.

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.

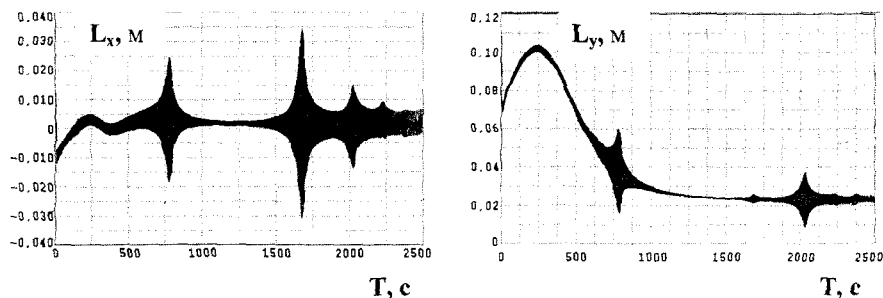


Рис. 11. Смещение верхнего (слева) и нижнего (справа) конца мачты в горизонтальном направлении соответственно по осям Ox L_x и Oy L_y в зависимости от времени (показано в виде колебательного закона)

Пример на рис. 12 приведен для одной из сил F_y , действующей в горизонтальном направлении на мачту со стороны вала ротора и вызывающей резонанс мачты ВЭУ.

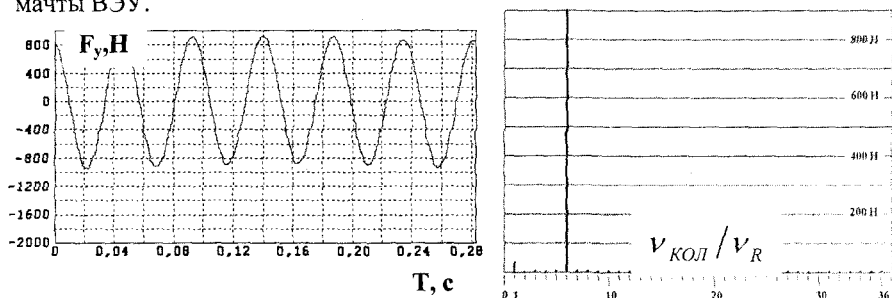


Рис. 12. Зависимость силы F_y (слева), действующей на мачту со стороны вала ротора и направленной перпендикулярно ветровому потоку, от времени T . Спектр Фурье колебательной составляющей силы F_y (справа). Постоянная составляющая силы $F_y = 10,8$ Н. Гармоника с номером 1 имеет частоту вращения ротора. Наблюдается 1-ый резонанс узла подшипников в момент $T=156$ с ($V=12$ м/с, $N=211,8$ об/мин, $\nu_R = 3,53$ Гц). V – скорость ветра; N – скорость вращения ротора; ν_R – частота вращения ротора; T – время, с

По оси абсцисс на спектре Фурье отложена безразмерная величина

$\nu_{КОЛ} / \nu_R$, равная отношению частоты колебаний силы, приложенной к мачте ВЭУ $\nu_{КОЛ}$, к частоте вращения ротора ν_R .

На основании анализа спектров частот получены данные, свидетельствующие о наличии ряда резонансов при вращении ротора.

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 силами, 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 комплектовочных, удовлетворяющих условиям эксплуатации в составе ВЭУ. В результате варьирования материалом и жесткостью была применена мачта с низкой частотой собственных колебаний $\nu_m = 0,4$ 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.

Т.о. путем подбора материала мачты, а также диаметра и натяжения выпускаемых промышленностью тросов и многократного прогона математической модели в среде VisSim получено оптимальное соотношение следующих параметров:

- материал тросов-растяжек – канат одинарной свивки типа ТК. Конструкция: 1x19(1+6+19) ГОСТ 3063, ДИН 3053;
- диаметр тросов-растяжек 15 мм;
- натяжение тросов-растяжек 1700 Н.

В соответствии с найденными параметрами табл. 1 резонансов выглядит, как показано ниже. Резонансы подшипников на частоте 21 Гц не существенны в связи с их малой амплитудой. Резонанс мачты снижен до 0,4 Гц (интервал № 5) и находится на частоте вращения 24 об/мин, что не оказывает существенного влияния на работу ВЭУ и не создает опасных вибраций высокой амплитуды. К тому же ротор проходит данную частоту вращения за 1–2 с, т.е. длительность действия вибраций во время резонанса также невысока.

Таблица 1

Прогнозируемые резонансы ВЭУ с собственной частотой мачты 0,4 Гц

№ интервала	Начало малого интервала Т, с	Частоты возмущающих сил							Примечание
		Инерционные		Аэродинамические					
		ν_R	$6\nu_R$	$12\nu_R$	$18\nu_R$	$24\nu_R$	$30\nu_R$	$36\nu_R$	
1	156	3,53	21,1	42,26	63,40	84,53	105,66	126,8	1-й резонанс узла подшипников
2	242	2,97	17,8	35,66	53,50	71,33	89,16	107,0	простые колебания
3	502	1,77	10,6	21,20	31,80	42,40	53,00	63,6	2-й резонанс узла подшипников
4	783	1,01	6,0	12,84	18,13	24,17	30,21	36,2	простые колебания
5	1250	0,4	2,37	4,75	7,12	9,50	11,87	14,2	резонанс мачты
6	1682	0,17	1,02	2,00	3,01	4,01	5,01	6,01	простые колебания
7	1900	0,11	0,65	1,30	1,94	2,59	3,24	3,89	простые колебания
8	2030	0,08	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	простые колебания
9	2230	0,06	0,34	0,67	1,04	1,34	1,67	2,01	простые колебания

Учитывая вышесказанное, влияние резонанса мачты на фундамент на скорости вращения ротора 24 об/мин можно прогнозировать как незначительное. Тем не менее, учитывая важность решений, принимаемых на предмет размещения ВЭУ в непосредственной близости к жилым, офисным или производственным помещениям, полученные теоретические данные необходимо в каждом конкретном случае подтверждать экспериментом и замером соответствующих резонансов с целью их снижения до уровня, удовлетворяющего требованиям стандартов и нормативов.

Исследование вертикальных воздействий (в том числе вибро смещения упругой мачты) позволяет оценить воздействие ВЭУ на фундамент и мачты ВЭУ на ступицу (рис. 13). 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) могут выработываться 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.

После корректировки конструкторской документации, замены материалов и изменения архитектуры компонентов картина вертикальных вибро смещений в резонансе выглядит, как показано на рис. 13.

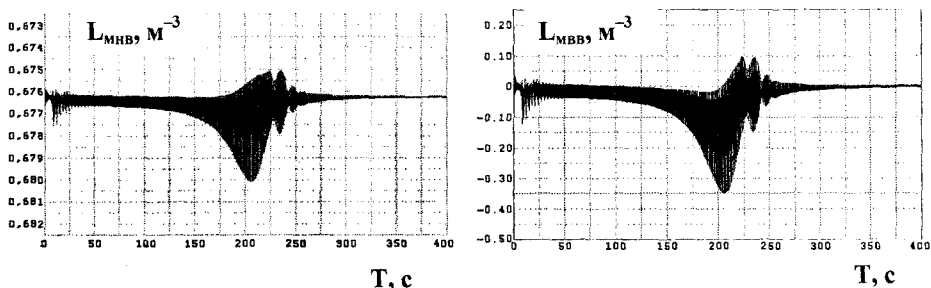


Рис. 13. Смещение L_{MNB} нижней (слева) и L_{MBB} верхней (справа) точек мачты в месте крепления соответственно к фундаменту и ступице в вертикальном направлении (мм) в зависимости от времени T (с)

Амплитуда колебаний верхней точки крепления мачты к ступице составляет $0,00035 = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м. Амплитуда колебаний нижней точки основания мачты равна $x = 0,0000024 = 2,4 \cdot 10^{-6}$ м. Это наиболее важный параметр, оказывающий негативное влияние на фундамент и в целом окружающую среду. Анализ показывает, что в спектре колебаний практически присутствуют только две частоты; это частоты первой и второй форм колебаний.

$$\nu_1 = 0,82 \text{ Гц} \quad \nu_2 = 3,5 \text{ Гц}; \quad (1)$$

Для колебаний, близких по форме к гармоническим, амплитуда виброускорений определяется как

$$A = x \cdot \omega^2 = x \cdot (\nu \cdot 2 \cdot \pi)^2; \quad (2)$$

Вычисления дают соответственно:

$$A_1 = 3,185 \cdot 10^{-3} = 0,00003185 \text{ м/с}^2, \quad A_2 = 58,033 \cdot 10^{-3} = 0,0005803 \text{ м/с}^2. \quad (3)$$

Сравнение данных табл. 11 ГОСТ 12.1.012-90 «Вибрационная безопасность» и полученных расчетных данных проводится по табл. 2.

Таблица 2

Нормативы вибраций по ГОСТ 12.1.012-90 и расчетные данные

Табличные данные ГОСТа 12.1.012-90		Полученные данные	
Среднегеометрические частоты полос, Гц	Амплитуда виброускорений, м/с ² в 1/3 окт.	Частота, Гц	Амплитуда виброускорений, м/с ² в 1/3 окт.
1,6	0,0125	0,82	0,00003185
3,15	0,009	3,50	0,0005803

Сравнение близких по значению нормативных и расчетных частот показывает, что даже с учетом длительного пребывания в непосредственной близости к ВЭУ человек будет испытывать вибронгрузки значительно меньше допустимых. Согласно требованиям санитарных норм СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация. Вибрации в помещениях жилых и общественных зданий» допустимый уровень общих вибраций по виброускорению составляет $0,004 \text{ м/с}^2$ в диапазоне 2–63 Гц среднегеометрических частот полос. Таким образом, полученные данные удовлетворяют соответствующим стандартам и нормативам. Необходимо учесть, что резонансный режим колебаний мачты ВЭУ на практике не может продолжаться так долго, следовательно, прогнозируемые оценки вибровоздействия сильно завышены и имеют запас.

Таким образом, негативное действие аэродинамических сил может быть снижено за счет варьирования материалами и архитектурой (конфигурацией) компонентов конструкции ВЭУ.

Дисбаланс ротора должен устраняться с помощью регистрации вибраций и весовой балансировки (рис. 14). С учетом того, что собственные резонансы ВЭУ на этапе теоретических исследований за счет варьирования материалами компонентов и архитектурой ротора сведены к минимуму, экспериментальные

исследования проводятся на предмет выявления дисбаланса ротора, обусловленного неидеальностью изготавливаемых элементов, неоднородностью материалов и погрешностями сборки.

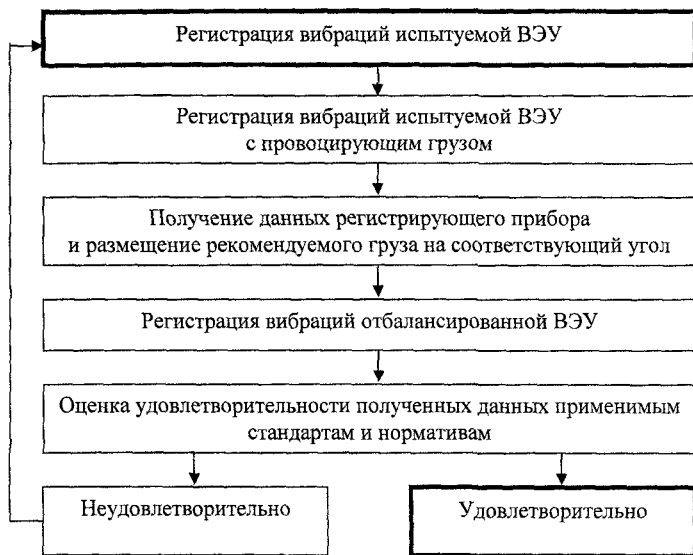


Рис. 14. Процедура вибробалансировки ротора ВЭУ

Вибрационные исследования и балансировка ротора ВЭУ основываются на методике весовой балансировки вращающихся винтов (роторов) вертолетов, хорошо изученной предприятиями, производящими летательные аппараты – Казанским вертолетным заводом, Кумертауским авиационным производственным предприятием (КумАПП) и другими известными фирмами.

В процессе проведения исследований было рассмотрено несколько известных методик вибробалансировки роторов, однако большинство из них не нашли применения в проводимых экспериментах в связи с невозможностью использования в данном случае и/или их дороговизной.

Экспериментальные исследования вибрации и вибробалансировка ротора ВЭУ-3(6) мощностью 3 кВт производства ООО «ГРЦ-Вертикаль» проведены в г. Кумертау (Башкортостан) 1–4 июля 2008 г., на базе цеха № 42 ОАО «КумАПП».

Методика весовой балансировки роторов, предназначенная для снижения вибрационных колебаний в предэксплуатационный период, основана на регистрации вибраций и последующему их снижению за счет соответствующей методики установки весов (грузов) на лопастях (или траверсах) ВЭУ (рис. 15, 16).

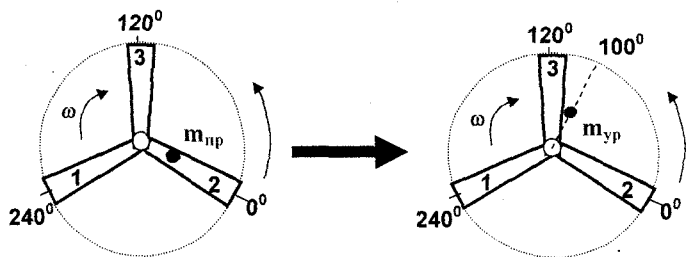


Рис. 15. Иллюстрация вибробалансировки ротора ВЭУ (вид на ротор сверху)



Рис. 16. Исследование испытуемой установки на предмет определения вибросмещений ротора и проведения весовой балансировки в предэксплуатационный период с целью снижения вибраций

Результаты вибробалансировки ротора ВЭУ-3(6):

- до балансировки вертикальное вибросмещение в резонансе – 5,2 мм (0,0052 м);
- после балансировки вертикальное вибросмещение в резонансе – 0,3 мм (0,0003 м).

Вибробалансировка проведена с помощью виброанализатора К-4102.

Вертикальное вибросмещение в месте крепления ротора к имитатору мачты (опора типа «гусь») соответствует расчетным данным, полученным на этапе теоретических исследований.

После монтажа ротора ВЭУ-3 на штатной мачте 30 декабря 2008 г. в городе Челябинске на базе Легкоатлетического манежа результаты измерений вибросмещений верхнего конца крепления мачты к ступице также соответствуют теоретическим расчетам и составляют 0,23 мм (0,00023 м). Амплитуда

вибросмещения нижнего конца мачты на частоте 2 Гц составила $2,2 \cdot 10^{-6}$ м, амплитуда виброускорения составила $0,000045 \text{ м/с}^2$ (допустимое значение составляет $0,004 \text{ м/с}^2$ по СН 2.2.4/2.1.8.566-96).

Таким образом, экспериментом доказано, что весовая балансировка ротора может применяться для вертикально-осевых ветроэнергетических установок для снижения вибрационных колебаний до уровня, удовлетворяющего соответствующим ГОСТ и СНиП.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают возможность размещения ветроэнергетических установок ВЭУ-3 производства ООО «ГРЦ-Вертикаль» в непосредственной близости к жилым, производственным и офисным зданиям. Монтаж ВЭУ-3 непосредственно на инженерных сооружениях и зданиях теоретически возможен, однако требует дополнительных исследований, связанных с изучением отклика здания или сооружения на возмущающее вибровоздействие ветроустановки.

Расчет потенциального рынка ветроэнергетических установок, подлежащих размещению в непосредственной близости к зданиям и сооружениям, а также на них, проведен исходя из объема установленных мощностей предприятий ОАО РАО «ЕЭС России» и составляет 1,6 млн. кВт установленной мощности ВЭУ. В случае размещения ветроустановок в непосредственной близости к жилым, офисным или производственным помещениям, установочные расходы снижаются за счет отсутствия высокой мачты и уменьшения длины линий электропередач на 20-25%. Эксплуатационные расходы снижаются на 50% за счет отсутствия необходимости проведения высотных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача обеспечения вибробезопасности ветроэнергетической установки (ВЭУ) с вертикальной осью вращения, которая может быть использована для подавляющего большинства вертикально-осевых ВЭУ.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и сделать выводы:

1. Основным негативным параметром, ограничивающим применение ветроустановок, являются вибрационные колебания и резонансные явления, возникающие при работе ВЭУ под действием возмущающих аэродинамических сил и дисбаланса ротора.

2. Выявлены зависимости влияния аэродинамических и центробежных сил на процесс возникновения вибраций, действующих по негармоническим колебательным законам, которые можно разложить в ряд Фурье с последующим проведением спектрального анализа.

3. На основе анализа созданных компьютерной (трехмерной), математической (функциональной) моделей и физического действующего образца ВЭУ создан метод определения пригодности материалов для использования в соста-

ве комплектующих ВЭУ, при этом появляется возможность оптимизации конструкции компонентов и архитектуры ротора с целью снижения общей вибрации.

4. Разработанный метод весовой балансировки ротора позволяет снизить вертикальное виброремещение ротора ВЭУ в 10-15 раз. Конечный результат вибробалансировки с большим запасом удовлетворяет действующим ГОСТ и СНиП в части вибраций. При определенной доработке балансировку можно проводить в автоматическом режиме в процессе эксплуатации ВЭУ.

5. Результаты теоретических и экспериментальных испытаний вертикально-осевых ВЭУ показали необходимость корректировки действующих стандартов по ветроэнергетике с целью внесения особенностей вертикально-осевых ветроустановок и уточнения требований к вибробезопасности ВЭУ.

6. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований доказывают безопасность размещения исправной отбалансированной ветроэнергетической установки ВЭУ-3(6) в непосредственной близости к жилым, офисным и производственным зданиям, при условии удовлетворительности коммуникаций и конструкции здания (сооружения) применимым стандартам и нормам.

7. Методики оптимизации конструкторских решений и весовой балансировки ротора внедрены в процессы проектирования и производства малых вертикально-осевых ветроэнергетических установок на следующих предприятиях:

- ООО «ГРЦ-Вертикаль», Челябинская область, г. Миасс;
- ОАО «Государственный Ракетный Центр», КБ им. академика В.П. Макеева, Челябинская область, г. Миасс;
- ОАО «Кумертауское авиационное производственное предприятие», Башкортостан, г. Кумертау.

Научные публикации по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки «ГРЦ-Вертикаль» / Е.В. Соломин, И.М. Кирпичникова, В.П. Кривоспицкий // Вестник МАНЭБ. Приложение «По Материалам I Международной научно-практической конференции «Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: экономика, экология, опыт применения». – СПб.-Чита. – 2008. – Т.13. – №3. – С.129–134.

2. Соломин, Е.В. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения / Е.В. Соломин, И.М. Кирпичникова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 10, №26. – С.15–16.

Другие научные публикации по теме диссертации:

3. Соломин, Е.В. Описание ВЭУ ООО «ГРЦ-Вертикаль» / Е.В. Соломин // Журнал «Деловой Север» от 17.05.2008. – Екатеринбург. – С.8–9.

4. Соломин, Е.В. Ветроэнергетика для дома и офиса. Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения мощностью 1...100 кВт для дома и промышленности / Е.В. Соломин, Ю.В. Грахов, И.М. Кирпичникова и др. //

Материалы V Международной научно-практической конференции «Возобновляемые источники энергии. Ресурсы. Системы энергогенерирования на возобновляемых источниках энергии». – М., 2008. – С.37–39.

5. Соломин, Е.В. Программно-математическая модель ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения / Е.В. Соломин, Ю.В. Грахов, И.М. Кирпичникова // Материалы V Международной научно-практической конференции «Возобновляемые источники энергии. Ресурсы. Системы энергогенерирования на возобновляемых источниках энергии». – М., 2008. – С.41–42.

6. Соломин, Е.В. Вертикально-осевые ветроэнергетические установки: «Сделано в России» / Е.В. Соломин // Материалы Межрегионального совета по науке и технологиям. «Механика и процессы управления» и «Проблемы машиностроения». – Екатеринбург–Миасс: УрО РАН, 2008. – С. 17–19.

7. Соломин, Е.В. Особенности вертикально-осевых ВЭУ производства «ГРЦ–Вертикаль» / Е.В. Соломин // Малая энергетика. – М.: Изд-во НИИЭС, 2009. – № 3(8). – С. 57–61.

8. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ–Вертикаль. Перспективы развития // 60-я юбилейная научная конференция, посвященная 65-летию Южно-Уральского государственного университета. Секция «Технические науки»: материалы конференции. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2008. – Т. 1. – С. 23–26.

9. Соломин, Е.В. Социальные, экономические и правовые аспекты размещения ветроустановок на зданиях и сооружениях / Е.В. Соломин, И.М. Кирпичникова // Малая энергетика. – М.: Изд-во НИИЭС, 2009. – № 1. – С. 56–61.

10. Соломин, Е.В. Методика балансировки ротора ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения / Е.В. Соломин, И.М. Кирпичникова // Малая энергетика. – М.: Изд-во НИИЭС, 2009. – № 1. – С. 48–52.

11. Пат. 2244996 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 К 19/16 1/06. Генератор переменного тока / Е.В.Соломин. – № 2003124088/09; заявл. 31.07.03; опубл. 20.01.2005, Бюл. № 2. – 3 с.

12. Положительное решение о выдаче патента на изобретение «Ротор ветряной установки с вертикальной осью вращения» от 16.05.2008 / Е.В. Соломин, Ю.В. Грахов и др. №2006117014/06(018497), заявл. 12.05.2006.