

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.311.24
ББК 31.62

ИТЕРАЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Е.В. Соломин
г. Челябинск, ЮУрГУ

ITERATION OPTIMIZATION OF PARAMETERS AND MODES OF OPERATION OF VERTICAL AXIS WIND DRIVER GENERATORS

E.V. Solomin
Chelyabinsk, South Ural State University

Описан системный подход к оптимизации конструктивных параметров, режимов работы и аэродинамических характеристик вертикально-осевых ветроэнергетических установок на основе последовательно-параллельных исследований.

Ключевые слова: ветроэнергетика, возобновляемые источники энергии, турбины, альтернативная энергетика.

The article describes the systems approach to optimization the design parameters, operation modes and aerodynamic characteristics of vertical axis wind driver generators on the basis of series-parallel research iterations.

Keywords: windpower engineering, renewable energy sources, turbines, alternative energy.

Процесс исследования параметров ветроэнергетических установок на основе экспериментальных исследований является более дорогостоящим, чем использование современных средств компьютерного моделирования.

Процесс оптимизации конструктивных параметров модулей вертикально-осевых ветроэнергетических установок (ВО ВЭУ) включает ряд теоретических и экспериментальных этапов исследований модулей, по завершении которых проводится сравнение полученных расчетных и опытных характеристик с проверкой на удовлетворительность по соответствующим критериям и повторением предыдущих этапов в случае необходимости. Каждый такой цикл является итерацией (рис. 1). Причем этапы внутри итерации могут проводиться как последовательно, так и параллельно.

Разработка и оптимизация профиля лопасти включает в себя патентный поиск, теоретические и экспериментальные исследования различных профилей, анализ результатов и выбор наиболее эффективного профиля. Патентный поиск проводится в российских и зарубежных базах данных в полном объеме согласно ГОСТ Р 15.011-96 «Па-

тентные исследования». С целью выбора оптимального профиля лопасти, как правило, анализируется ряд профилей.

Модель каждого профиля строится в CAD-программе. Расчетные значения коэффициентов подъемной силы C_y и силы сопротивления C_x для разных углов атаки с поворотом лопасти к моделируемому набегающему потоку ветра заносятся в CFХ-программу [2] на основе инструмента генерации сетки при импорте из CAD-программы. Формулы сил выражаются уравнениями (1).

$$C_y = \frac{Y}{\frac{\rho v^2}{2} s}; \quad C_x = \frac{X}{\frac{\rho v^2}{2} s}, \quad (1)$$

где Y – подъемная сила, X – сила лобового сопротивления, ρ – плотность среды, v – скорость потока, s – площадь крыла (профиля). Сила лобового сопротивления складывается из профильного X_p (сопротивление давления и трения), индуктивного X_i и волнового X_v сопротивлений:

$$X = X_p + X_i + X_v \approx X_p. \quad (2)$$

Подъемная сила каждого профиля вычисляется во всем диапазоне углов атаки 0–360°. На осно-

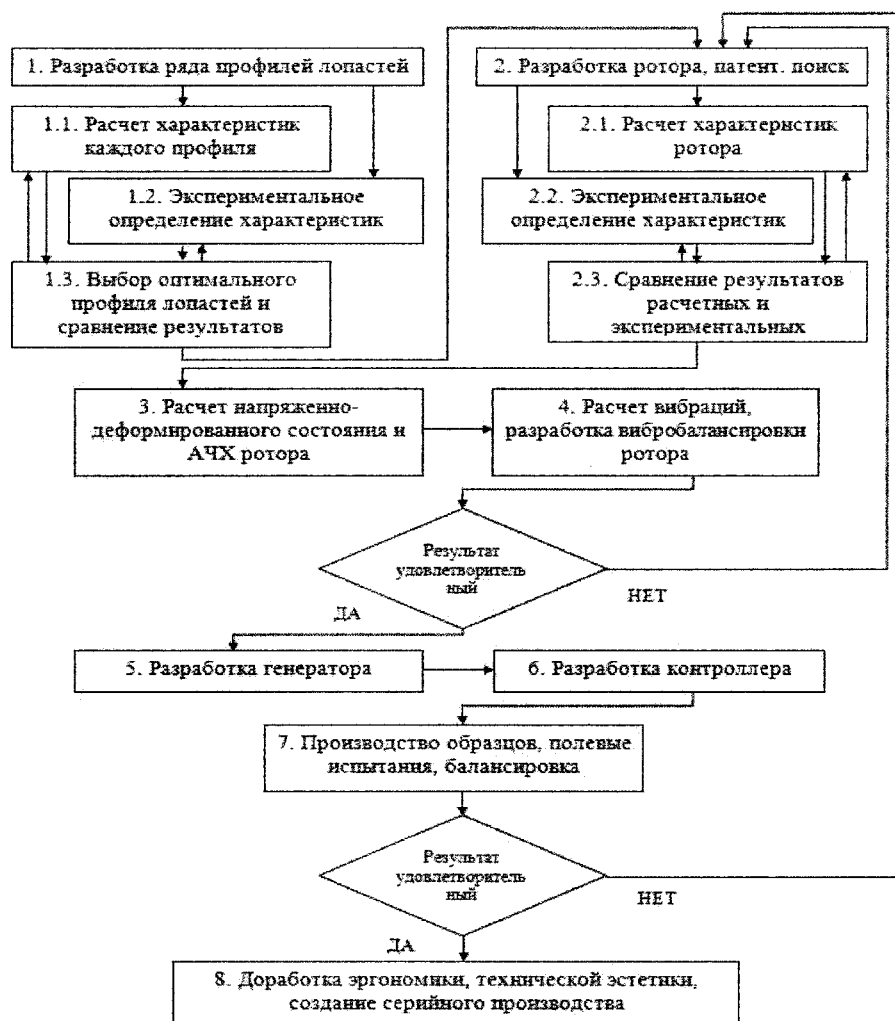


Рис. 1. Процесс последовательно-параллельной итерационной оптимизации параметров ветроэнергетической установки

ве этих данных строятся характеристики профиля. В результате анализа расчетных данных выбирается базовый профиль, показывающий наибольшую удельную подъемную силу.

После проведения теоретических вычислений профилей изготавливаются модели лопастей и исследуются на предмет получения экспериментальных аэродинамических характеристик в аэродинамической или гидродинамической трубе (с соответствующим пересчетом). В приведенном примере в связи с проведенным анализом расчетных и экспериментальных данных, а также на основании патентных исследований для исследуемой ВО ВЭУ мощностью 3 кВт (ВЭУ-3) был выбран патентоспособный профиль SRCV2035 отечественной разработки [3].

Разработка и оптимизация ротора ВО ВЭУ включают в себя патентный поиск, трехмерное компьютерное моделирование компонентов ротора, функциональное компьютерное моделирование ротора, исследование взаимовлияния компонентов ротора, оптимизацию параметров ротора, отладку

трехмерных моделей, разработку агрегатов аэродинамического регулирования и т. д. Критерии оптимальности – самостоятельный старт ротора во всем диапазоне быстроходности, ограничение максимальной частоты вращения, достижение максимального коэффициента мощности (коэффициента использования энергии ветра, КИЭВ), снижение влияния концевых эффектов на лопастях, эргономика, техническая эстетика.

Конструкция ротора двухярусной шестилопастной ВЭУ минимальной мощности 3 кВт разработана с помощью модифицированной импульсной теории, позволяющей проводить расчеты аэродинамических характеристик ротора, представленного в виде двух дисков с генерацией индуктивных скоростей. Второй ярус добавлен с целью увеличения плавности работы ротора и дополнительного увеличения мощности.

Анализ литературы и предварительных расчетов показывает, что при коэффициенте быстроходности $Z < 2$ динамический срыв потока с лопастей ротора Дарье доминирует на большей части

траектории лопасти. Увеличение числа модулей быстроходности приводит к подавлению процесса формирования динамического срыва потока с вертикальных лопастей, но также снижается возможность самостоятельного старта. Тогда с учетом графика идеального Дарье граничные условия для Z : $6 > Z > 2$. В зонах умеренных ветров ВЭУ должна начинать работу с 4 м/с. Ротор получает 100 % энергии с периметра. Расчет производится для радиуса R , который вычисляется из соотношения $1,5R > L > 4b$, где L – длина лопасти. Такие данные взяты из соображений прочности компонентов и минимизации влияния индуктивного сопротивления. Оптимальная быстроходность исследуемого ветроколеса при наибольшем коэффициенте мощности C_p составляет $Z = 4\pi/m \approx 2$, где m – количество лопастей (6 в исследуемом варианте). Или с соответствующей поправкой для тщательно спрофилированных лопастей будет на 34 % выше, т. е. 2,68. При скорости ветра 4 м/с окружная скорость лопастей $v = 10,7$ м/с. Ветер взаимодействует с лопастями с окружной скоростью. Для устойчивой работы ВЭУ необходимо получить число Рейнольдса $Re \geq 300000$. Тогда хорда лопасти должна быть $b = Re / (68500v) = 0,4$ м. Граничные значения при оптимизации хорды лопасти каждого яруса составили $0,5 \text{ м} > b > 0,3 \text{ м}$. Приняв длину лопасти L в соответствии с вышеприведенными доводами за 2 м, радиус R получается соответственно 1,7 м (с учетом добавки радиуса ступицы 0,4 м). Тогда соотношение хорды b к диаметру D составит 11 %, что совпадает с соотношениями горизонтально-осевых ВЭУ (5–15 % по среднему диаметру лопасти). При этом коэффициент геометрического заполнения ротора получается 0,35. Исследования модели показывают, что это значение вместе с фиксированным углом установки лопастей $\varphi = 4,1^\circ$ позволяет получить положительный стартовый крутящий момент практически во всем диа-

пазоне коэффициента быстроходности – отношение линейной скорости точек лопасти к скорости ветра (рис. 2). Длина лопасти 2 м выбрана из соотношения $L_{\text{лоп}} \approx 6b$ для исключения влияния концевых эффектов, а также соображений эргономики.

Таким образом, можно сформулировать основные параметры и соотношения:

$D = 3,4$ м – диаметр ротора;

$2L_{\text{лоп}} = H = 4,1$ м – высота ротора;

$S = DH = 13,94 \text{ м}^2$ – ометаемая площадь ветроколеса;

$b = 0,4$ м – длина хорды симметричного профиля лопасти;

$c = 35$ % – относительная толщина профиля;

$m = 6$ – количество вертикальных лопастей;

$\varphi = 3,5 \dots 4,1^\circ$ установочный угол лопасти;

$Z = \omega R / V$ – быстроходность (отношение линейной скорости точек лопастей к скорости ветра), где ω – угловая скорость,

V – скорость ветра;

$C_m = 2M / (\rho V^2 SR)$ – коэффициент крутящего момента M ;

ρ – плотность воздуха;

$C_p = 2P / (\rho V^3 S) = C_m Z$ – коэффициент мощности;

P – аэродинамическая мощность ротора.

Расчетные графики для коэффициента использования энергии ветра (КИЭВ) и крутящего момента в зависимости от быстроходности Z приведены на рис. 2, где P – аэродинамическая мощность; S – фронтальная площадь; M_z – крутящий момент; ρ – плотность воздуха; V – скорость ветра. Теоретический КИЭВ близок к 40 %. Максимум коэффициента мощности C_p (коэффициента использования энергии ветра) ротора лежит в диапазоне $C_p = 0,37 \dots 0,40$ при быстроходности $Z = 2,5 \dots 3,2$. При быстроходности менее 2 и более 4 эффективность значительно меньше.

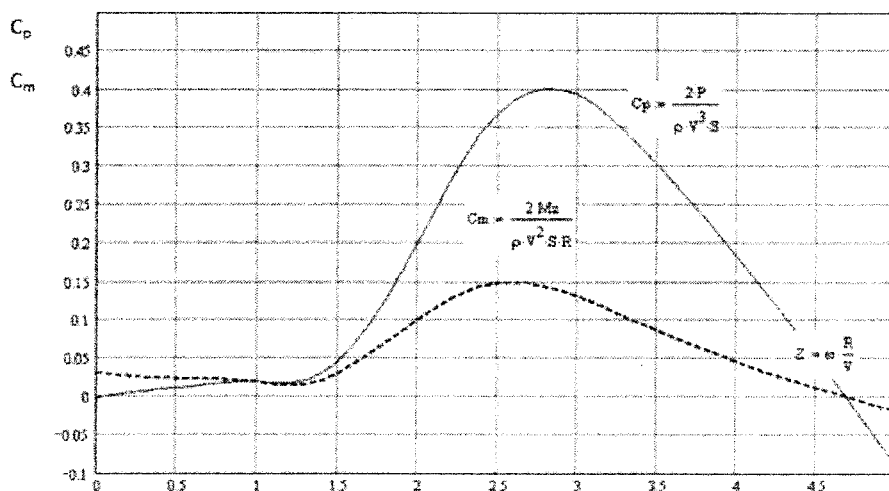


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента использования энергии ветра C_p и крутящего момента C_m от быстроходности Z

Результаты расчетов приводят к очень важному выводу – при осуществлении регулирования мощности ВЭУ за счет поддержания частоты вращения ротора на определенных уровнях можно оптимизировать работу ВЭУ, поддерживая КИЭВ максимальным при разных скоростях ветра.

С целью оптимизации мощности ВЭУ строится график нагрузок ротора, который можно представить изолиниями мощности (рис. 3).

При определенной скорости ветра ротор располагает определенной мощностью. Если нагрузить генератор меньшей мощностью, использование ротора будет неэффективно. Если перегрузить генератор большей мощностью, чем располагает ротор, кинетическая энергия ротора перейдет в электрическую энергию генератора и ротор остановится. Более того, при превышении мощности, на которую рассчитан генератор, можно вывести его из строя. В связи с этим задача регулирования

мощности ВЭУ и оптимизации работы решается следующим образом:

- максимальная частота вращения ограничивается аэродинамическими регуляторами, не позволяющими ротору раскручиваться свыше определенной частоты (тонкая пунктирная линия на рис. 3);
- во всем диапазоне частот вращения до максимальной необходимо отслеживать характеристику, показанную на рис. 3 жирной пунктирной линией.

После проведения теоретических вычислений изготовлен ряд роторов ВЭУ и проведены испытания на полигонах ГРЦ-Вертикаль в Челябинской области. Результаты испытаний всех роторов являются похожими и повторяются с разницей 3–7 %. Данные выходной мощности регулятора (контроллера) ротора ВЭУ-3 (№03-09-008), полученные с помощью записи на флэш-карту, приведены на рис. 4.

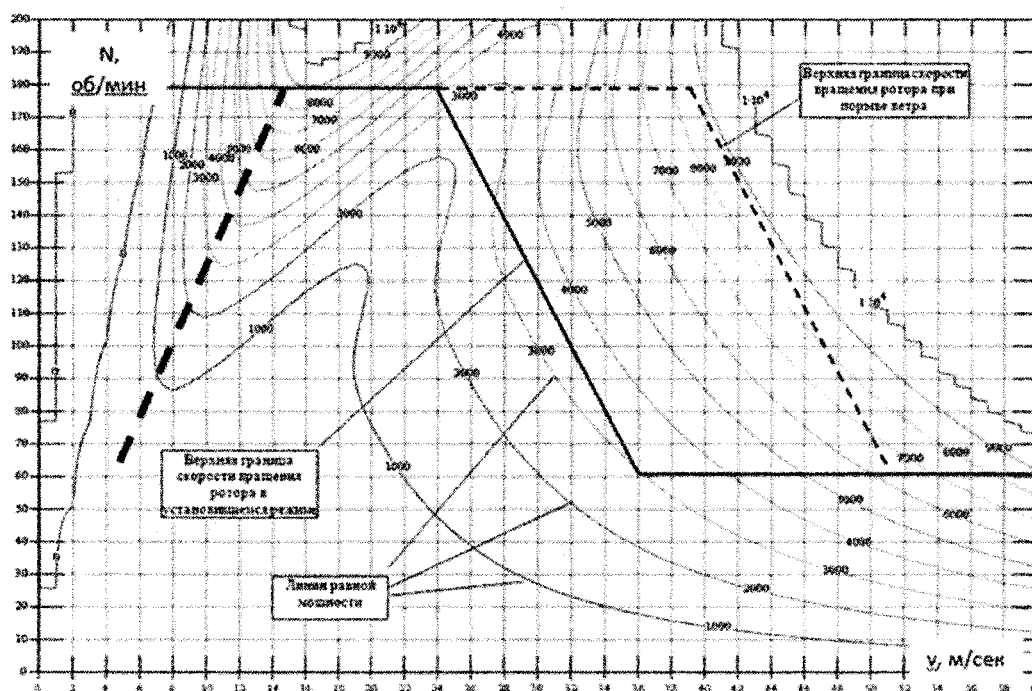


Рис. 3. Поле мощностей ротора ВЭУ с учетом нагрузки и КИЭВ

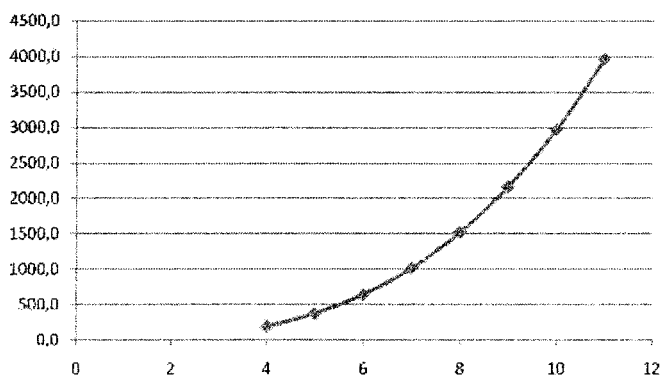


Рис. 4. График мощности ВЭУ по экспериментальным данным

В эксперименте измерения проведены от 3 до 11 м/с. До 3 м/с выработка энергии минимальна и не представляет интереса. На скорости ветра 11 м/с активируются аэродинамические регуляторы и частота вращения стабилизируется на 180 об/мин. Мощность ВЭУ нормируется на 11 м/с и составляет минимум 3 кВт с учетом потерь на преобразование.

Анализ данных говорит о том, что реальный КИЭВ составляет 0,365 (в сравнении с теоретическим 0,38–0,40). Этот факт объясняется наличием неучтенных потерь (аэродинамические потери в местах болтовых соединений, погрешности сборки, люфт и т.д.). Это позволяет утверждать, что можно получить больший КИЭВ с учетом ряда конструктивных доработок. Однако очевидно, что задача регулирования решена, реализована и отработана, т.е. можно утверждать, что параметры ротора оптимизированы.

В процессе разработки ротора ВЭУ создана

конструкторская документация, эволюционирующая по мере улучшения конструкции. Проведены поверочные расчеты конструкций оптимизированных компонентов с учетом внешних возмущающих воздействий, взаимовлияния компонентов друг на друга и на окружающую среду.

ВЭУ представлена рядом основных модулей (рис. 5) и является интегрированной системой преобразования кинетической энергии набегающего потока ветра в электрическую энергию за счет непосредственной передачи момента вращения ротора на вал генератора.

Поэтапная оптимизация конструкций механических компонентов ВЭУ на основе итераций (повторяемых поэтапных прогонов) двух последовательных математических моделей трехмерной и функциональной является по сравнению с экспериментом недорогим способом улучшения изделия в целом (рис. 6).

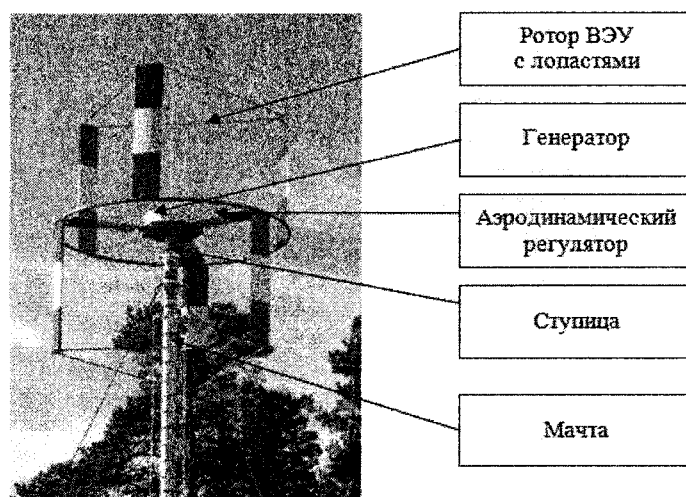


Рис. 5. Ветроэнергетическая установка ВЭУ-3 мощностью 3 кВт



Рис. 6. Поэтапная итерационная оптимизация параметров компонентов

Разработка и анализ конструкции компонентов производится с точки зрения наилучшей аэродинамики с учетом требований по безопасности, устойчивости к внешним воздействиям, надежности, эргономики и технической эстетики, с учетом ГОСТ Р 51237-98, ГОСТ Р 51990-2002, ГОСТ Р 51991-2002 и рядом допущений (ламинарность и устойчивость давления и направления ветрового потока, однородность материалов).

На основе трехмерной (3D) компьютерной модели, построенной в программном комплексе MSC/NASTRAN, методом конечных элементов определены силовые факторы и напряженно-деформированное состояние, вычислены частоты собственных колебаний компонентов, проведен подбор удовлетворительных материалов, конструкция проанализирована на удовлетворительность всех параметров. Вычисления проведены для предельно допустимой скорости ветра 45 м/с.

Максимальные напряжения в основных элементах силовой конструкции ВЭУ сведены в таблицы. Конечно-элементные модели ступицы и лопасти приведены на рис. 7. Наиболее нагруженным элементом конструкции является основание, в котором максимальные напряжения достигают 1250 МПа (в зонах крепления траверс).

На основе математической функциональной модели, построенной в программе – визуальном симуляторе функций VisSim, проведен анализ воздействия возмущающих аэродинамических и центробежных сил и моментов на конструкцию ВЭУ, выявлены возможные резонансы, получены численные значения виброперемещений и воздействия на фундамент, а затем проведена оптимизация конструкции за счет регулирования жесткости и формы элементов (при необходимости с повторением этапов 1–3 (рис. 1, 2) с целью смещения резонансных явлений в безопасные частоты).

Поведение системы определяется системой дифференциальных уравнений сил и моментов с учетом силового воздействия, перемещения, трения, упругости:

$$M\ddot{x} + R\dot{x} + Kx = F; J\ddot{\omega} + D\dot{\omega} + B\omega = M, \quad (9)$$

где M, R, K, J, D, B – матрицы коэффициентов.

Ввод данных осуществлялся по блоку, с включением обратных связей и выводом графиков. На основании исследований функциональной модели ВЭУ получены зависимости колебаний сил и моментов, частотные спектры и величина виброперемещений компонентов. Анализ спектра силовых воздействий проведен способом разложения действующих негармонических колебаний сил, моментов и виброперемещений 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, составлены таблицы резонансов.

Из анализа полученных данных следует, что резонанс колебаний элементов ВЭУ может вызываться как дисбалансом массы ротора, так и действием переменных аэродинамических сил. Резонансная частота может быть изменена за счет варьирования жесткостью компонентов, то есть изменением частот их собственных колебаний (табл. 1).

Ограничение максимальной скорости вращения ротора исследуемой ВЭУ, а значит, упрощение конструкции контроллера, обеспечивают регуляторы, заключенные в аэродинамические обтекатели (рис. 8), активируемые на определенной скорости вращения ротора и ограничивающие дальнейшее увеличение частоты вращения. Аэродинамические регуляторы имеют щитки с обтекателями, которые при возрастании центробежной силы совершают поворот вокруг оси траверсы на червячной передаче, тем самым снижая скорость вращения. Данное изобретение позволило эксплуатировать ВЭУ на скорости ветра более номинальной 11 м/с без применения балластной нагрузки и остановки ротора. Конструкция также включена в общую функциональную математическую модель, которая в данной работе не приводится в связи с большим объемом.

Разработка генератора включает в себя все стадии традиционного проектирования электромашины. В исследуемой ВЭУ генератор представляет собой вентильную электрическую машину переменного тока на постоянных магнитах с осевым (аксиальным)

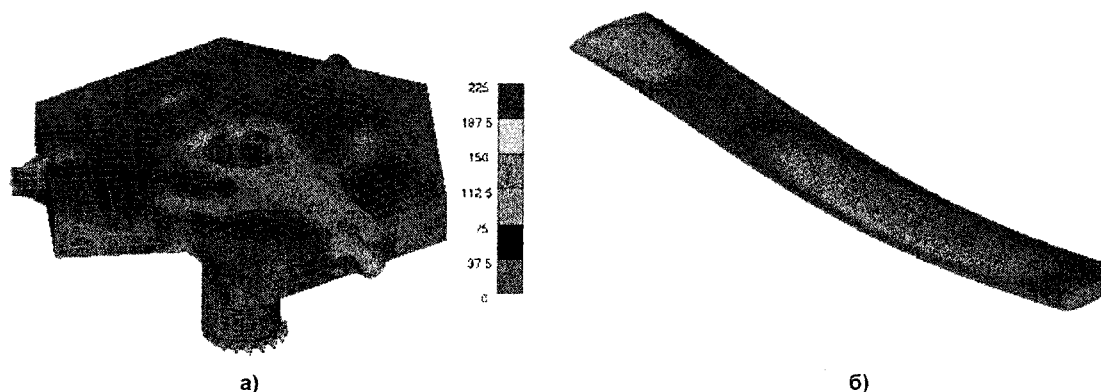


Рис. 7. Конечно-элементные модели ступицы ротора (а) и лопасти (б) ВЭУ-3 в NASTRAN (картина распределения эквивалентных напряжений)

зазором, с индуктором на постоянных магнитах и якорем в форме якорной обмотки (рис. 9).

Особенностью конструкции является требование минимального воздушного зазора между магнитной системой и обмоткой. Критерии оптимальности (минимальная масса активных частей, минимальный объем активных частей, минимальная масса постоянного магнита, минимальная масса обмотки, минимальная суммарная стоимость постоянных магнитов и обмотки) нашли отражение в результатах габаритной оптимизации (табл. 2).

Номинальная точка:

Номинальный ток, А	16,66
Номинальное напряжение, В	180
Номинальная мощность, Вт	3000
Номинальная частота вращения, об/мин	180
КПД в номинальной точке	0,847
Плотность тока, А/мм ²	8,9
Разработка электронного интеллектуального	

контроллера (регулятора) мощности исследуемой ветроэнергетической установки имеет следующие особенности:

- регулирование мощности ВЭУ в диапазоне частот вращения ротора от 40 до 180 об/мин с поддержанием максимального КИЭВ;
- частота вращения ротора ВЭУ ограничивается на 180 об/мин за счет аэродинамических регуляторов и далее не поднимается;
- отсутствие балластной нагрузки.

Схема контроллера построена на основе программируемого микроконтроллера с интерфейсом RS-232 (рис. 10).

Семейство малых вертикально-осевых ветроэнергетических установок мощностью 0,1–30 кВт разработано для автономных потребителей электроэнергии. В общей сложности полевые испытания прошло 9 различных по конструкции и мощности модификаций ВЭУ. Примеры приведены на рис. 11. Почти все установки продемонстрировали КИЭВ до 38 %.

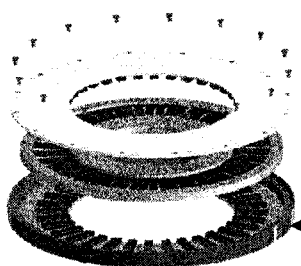
Таблица 1
Ожидаемые резонансы ВЭУ в диапазоне частот вращения 0–180 об/мин

Номер интервала	Начало малого интервала t, с	Частоты возмущающих сил							Примечание
		Инерци- онные	Аэродинамические						
			ν_p	$6 \nu_p$	$12 \nu_p$	$18 \nu_p$	$24 \nu_p$	$30 \nu_p$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	156	3.525	21.1	42.26	63.40	84.53	105.66	126.8	1-й резонанс узла подшипников
2	242	2.972	17.8	35.66	53.50	71.33	89.16	107.0	простые колебания
3	502	1.767	10.6	21.20	31.80	42.40	53.00	63.6	2-й резонанс узла подшипников
4	783	1.007	6.0	12.84	18.13	24.17	30.21	36.2	1-й резонанс мачты
5	1250	0.396	2.37	4.75	7.12	9.50	11.87	14.2	простые колебания
6	1682	0.167	1.02	2.00	3.01	4.01	5.01	6.01	2-й резонанс мачты
7	1900	0.108	0.65	1.30	1.94	2.59	3.24	3.89	простые колебания
8	2030	0.083	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3-й резонанс мачты
9	2230	0.056	0.34	0.67	1.04	1.34	1.67	2.01	4-й резонанс мачты



Поворотные щитки

Рис. 8. Аэродинамический регулятор вертикально-осевой ВЭУ



Индуктор на постоянных магнитах

Якорная обмотка

Индуктор на постоянных магнитах

Рис. 9. Генератор с осевым (аксиальным) зазором

Габаритная оптимизация (оптимизация по всем размерам)

Нар. диам. диска, мм	Внутр. диам. диска, мм	Осевая длина, мм	Число магн. на диске	Высота магн., мм	Толщ. диска, мм	Толщ. меди, мм
440	250	47	36	10	6,0	10
Число витков в фазе	Число витков в секунду	Диам. пров., мм	Возд. зазор, мм	Сопр. фазы, Ом	Масса двиг., кг	Масса магн., кг
338	18	1,5	1,0	0,97	22	17,3

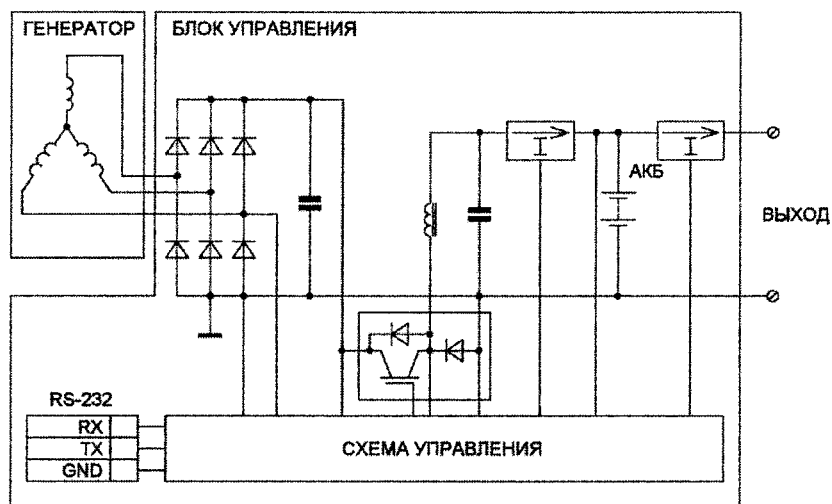


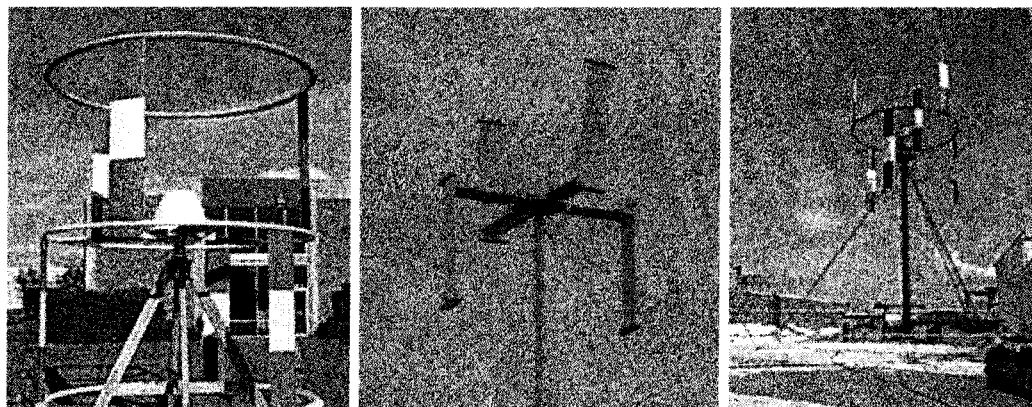
Рис. 10. Схема контроллера ВЭУ



0,1 кВт (Челябинск)

0,3–0,5 кВт (Челябинск)

1 кВт (США)



3 кВт (США)

3 кВт (Кумертау)

30 кВт (Челябинск)

Рис. 11. Семейство вертикально-осевых ВЭУ мощностью 0,1–30 кВт

Таблица 3

Значения виброскорости (ГОСТ 12.1.012-90) и эксперимент

Табличные данные ГОСТ 12.1.012-90		Экспериментальные данные	
среднегеометрические частоты полос, Гц	виброскорость, м/с, в 1/1 окт.	частота, Гц	виброскорость, м/с, в 1/1 окт.
3,15	$0,063 \cdot 10^{-2}$	3,0	$0,019 \cdot 10^{-2}$
6,3	$0,032 \cdot 10^{-2}$	6,0	$0,025 \cdot 10^{-2}$

Замеры шума и вибраций нескольких образцов ВЭУ-3 (3 кВт), проведенные в России и США на расстоянии 10 м от мачты ВЭУ при скоростях ветра 6–8 м/с, во всех случаях показали, что окружающий фон по уровню шума выше, чем от работающей под нагрузкой ВЭУ, о чем имеются акты соответствующих организаций [4].

Из табл. 3 следует, что ВЭУ можно размещать в непосредственной близости к производственным зданиям или даже на них.

На основе применения системного научного подхода к разработке компонентов ветроэнергетической установки реализована и внедрена методология оптимизации параметров вертикально-осевых ветроэнергетических установок (ВО ВЭУ). Создан, исследован и внедрен ряд конструкций ВО ВЭУ на основе модифицированного ротора «Дарье» с введением аэродинамического регулирования частоты вращения ротора и системы регулирования мощности ВЭУ с целью максимально эффективного использования энергии ветра. Анализ опытной эксплуатации ВЭУ показывает, что одним из основных негативных параметров, ограничивающих применение ветроустановок, являются шум, вибрационные колебания и резонансные явления, возникающие при работе ВЭУ под действием возмущающих аэродинамических сил и дисбаланса ротора. Данные явления можно за счет оптимизации параметров конструкции снизить до

уровней, требуемых стандартами и нормами. Выявлены зависимости влияния аэродинамических и центробежных сил на процесс возникновения вибраций, действующих по негармоническим колебательным законам. На основе анализа трехмерной и функциональной моделей создан метод оптимизации параметров конструкции компонентов и ротора в целом с целью снижения общей вибрации.

В результате проведенных научных и экспериментальных исследований создано и внедрено в производство семейство вертикально-осевых ветроэнергетических установок автономного применения, инициирована реализация плана электрификации малых автономных потребителей энергии в удаленных регионах России.

Литература

1. AutoCAD / www.autocad.ru / Сайт AutoCAD.
2. Сергейкин, О.А. Расчеты методом конечных элементов в ANSYS и NASTRAN / О.А. Сергейкин. – <http://sergeykin.nm.ru/>.
3. Пат. 2347104 Российская Федерация, МПК F03D 3/06 (2006.1). Ротор ветряной установки с вертикальной осью вращения / Ю.В. Грахов, Е.В. Соломин и др. – № 2006117014/06; заявл. 12.05.2006; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. – 12 с.
4. Соломин, Е.В. О компании / Е.В. Соломин // Сайт ООО «ГРЦ-Вертикаль». – www.src-vertical.com.

Поступила в редакцию 16.03.2011 г.

Соломин Евгений Викторович. Кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – ветроэнергетика. Контактный телефон: 8 (351) 264-76-94. E-mail: nii-uralmet@mail.ru

Solomin Eugeny. Candidate of Science (Engineering), an associate professor of the Electrical Engineering Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: wind energy. Tel: 8 (351) 264-76-94. E-mail: nii-uralmet@mail.ru