

УДК 534.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ^{*)}

© 2012 г. Ф.М. Митенков¹, В.Ф. Овчинников², М.Я. Николаев²,
Е.В. Кирюшина², А.А. Кирюшин², В.Н. Литвинов²,
Е.В. Фадеева², А.С. Чистов²

¹ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

²НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

minick@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 15.05.2012

Представлены результаты расчетного исследования динамики гибкого неоднородного ротора на электромагнитных подшипниках вертикально-осевой ветроэнергетической установки, полученные с помощью компьютерной модели, учитывающей основные факторы, влияющие на динамику ветроротора. Показана работоспособность установки.

Ключевые слова: вертикально-осевая ветроэнергетическая установка, гибкий неоднородный ротор, компьютерная модель, расчетное исследование динамики, система управления, электромагнитный подшипник.

Одно из ведущих мест среди возобновляемых источников энергии занимают ветроэнергетические установки (ВЭУ). Большая часть проектируемых и работающих ВЭУ относится к двум типам: горизонтально-осевым (пропеллерным), построенным по образу и подобию ветряных мельниц, с осью ротора, расположенной по направлению ветрового потока, и вертикально-осевым ВЭУ с осью, ортогональной потоку. Как показывают последние исследования, вертикально-осевые ветроэнергетические установки при одинаковой мощности ветрового потока не уступают горизонтально-осевым установкам по энергетическим характеристикам, а по простоте конструкции и технологии изготовления, по управляемости при эксплуатации и экологическим требованиям (более низкий уровень шумов и вибраций, меньшая опасность для птиц) превосходят их [1–10].

Возможность использования в вертикально-осевых ВЭУ надежного и относительно невысокого по капитальным затратам электромагнитного подвеса – дополнительный аргумент их состоятельности. Бесконтактная работа ротора уменьшает износ, загрязнение, вибрации, шумность, энергопотери на трение, соответственно

^{*)} Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством образования и науки РФ, РФФИ (грант 10-08-00882_a) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8).

увеличивает диапазон рабочих скоростей ветра. Отсутствие системы масляной смазки снижает затраты на вспомогательные системы, исключает возможности утечек смазки при высоких температурах и ее загустения при низких.

Разработка технологии электромагнитного подвеса сложного вертикального ротора ВЭУ связана с проведением необходимых расчетных и экспериментальных исследований динамики вращения ротора при воздействии на него многочисленных сил разной физической природы в различных эксплуатационных и нештатных ситуациях; ротор – неоднородный гибкий многоопорный, на осевых и радиальных электромагнитных подшипниках (ЭМП). Каждый ЭМП имеет свою систему управления электромагнитной силой подшипника. Задача системы управления – удержание ротора в пределах заданного зазора между ротором и статором в различных эксплуатационных режимах.

Для решения подобных возникающих при проектировании вертикально-осевой ветроэнергетической установки на электромагнитном подвесе задач разработана математическая модель [11] и программный комплекс расчетного исследования динамики вертикально-осевой ВЭУ на ЭМП. Комплекс включает в себя компьютерные модели: динамики сложного гибкого ротора; системы управления электромагнитными подшипниками; сил разной физической природы.

Исследования проводились для гипотетической ВЭУ, представленной на рис. 1.

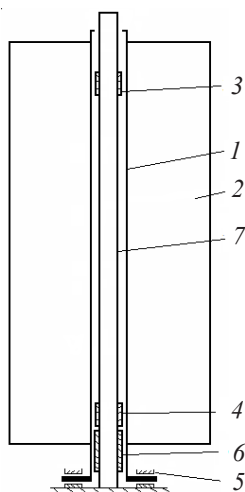


Рис. 1. Модель ВЭУ: 1 – центральная труба ротора; 2 – лопастная система; 3, 4 – управляющие радиальные ЭМП; 5 – осевая электромагнитная опора; 6 – электрогенератор; 7 – статор

Расчетная модель гипотетической установки состоит из центральной трубы диаметром 1200 мм и толщиной стенки 10 мм и лопастной системы. Высота ротора 20 м, материал – сталь. Лопастная система моделируется дополнительной массой 5000 кг, равномерно распределенной в цилиндрической области с внешним диаметром 10 м и внутренним диаметром 1,2 м. Масса всего ротора порядка 11000 кг. Осевой ЭМП расположен в нижней части ротора, а радиальные ЭМП – на расстоянии 3 м от верхнего и нижнего концов ротора. Статор в рассматриваемой модели предполагается жестким и неподвижным. В системе управления реализован изло-

женный в [12] алгоритм задания тока управления, позволяющий формировать необходимый закон изменения силы, действующей на ротор со стороны ЭМП. Использование этого алгоритма открывает возможности создания и отработки новых способов управления, парирующих нерегулярные внешние воздействия. При этом может быть использована информация, позволяющая оценить силовые воздействия на ротор, например, с автономных датчиков скорости ветра, датчиков ускорения основания статора при сейсмических воздействиях.

В вычислительных экспериментах в качестве возмущающих воздействий принимались ветровая нагрузка и силы инерции, обусловленные дисбалансом. Ветровое воздействие на радиальные ЭМП ротора передается через лопасти установки.

Результаты, полученные с помощью программного комплекса расчетного исследования динамики вертикально-осевой ВЭУ на ЭМП, представлены на рис. 2–5.

Первым этапом исследования является построение области устойчивости ротора в плоскости определяющих параметров системы управления – пропорционального коэффициента a и дифференциального коэффициента b (рис. 2).

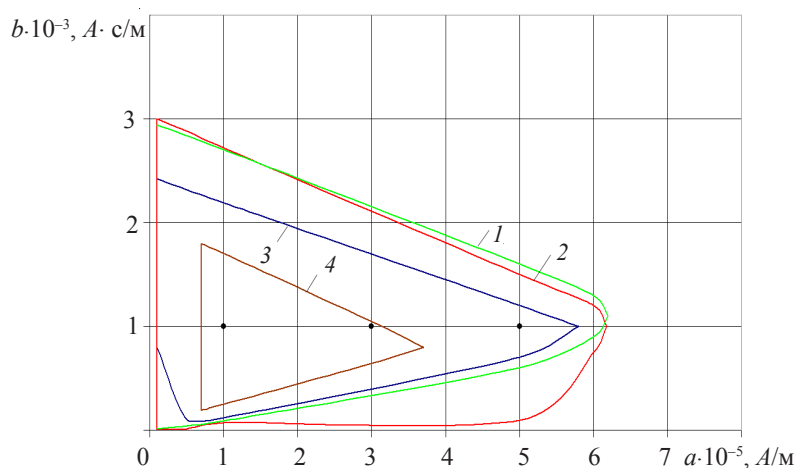


Рис. 2. Области устойчивости ротора ВЭУ в плоскости пропорционального и дифференциального коэффициентов (a , b) в зависимости от частоты вращения f и дисбаланса R : 1 – $f=0$, $R=0$; 2 – $f=1$ Гц, $R=0$; 3 – $f=1$ Гц, $R=2,5$ мм; 4 – $f=1$ Гц, $R=25$ мм

Анализируется случай одинаковых параметров управления для верхнего и нижнего радиальных ЭМП. Граница области устойчивости характеризуется параметрами управления, при которых отклонения ротора не превышают половины зазора между ротором и статором. В рассматриваемой модели зазор составляет 1,5 мм. На рис. 2 представлены области устойчивости при среднестатистической ветровой нагрузке для невращающегося ротора (частота вращения $f=0$) и для вращения с частотой $f=1$ Гц в зависимости от дисбаланса. Во всех расчетных исследованиях предполагался равномерный односторонний дисбаланс. Мерой дисбаланса выступает смещение центра масс ротора R от оси вращения. Представленные на рис. 2 кривые демонстрируют эффект стабилизации ротора гироскопическими силами (сравнение кривых 1 и 2) и эффект дестабилизации с ростом уровня дисбаланса (сравнение кривых 2, 3, 4). Значительное уменьшение области устойчивости даже на относительно высокой частоте вращения (1 Гц) происходит только при больших уровнях

дисбаланса ($R = 25$ мм). В рассматриваемом случае первая критическая частота оценивается величиной 12 Гц, а в представленных на рис. 2 результатах при докритической частоте вращения ротора силы дисбаланса не приводят к резонансному увеличению амплитуды колебаний и не оказывают существенного влияния на динамику ротора. Сопоставление качества переходных процессов в различных точках области устойчивости позволяет выбирать оптимальные параметры, обеспечивающие устойчивость ротора в диапазоне рабочих скоростей ветра.

При увеличении уровня дисбаланса или скорости ветра растет и уровень смещений ротора (A – расстояние до оси ротора от начала координат). Типичная зависимость такого роста при неизменных параметрах системы управления представлена на рис. 3 и 4.

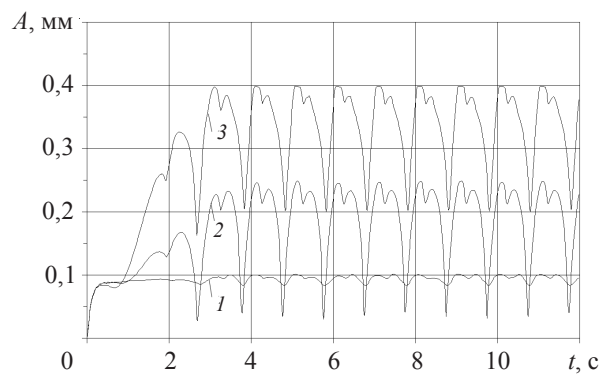


Рис. 3. Динамика смещений ротора при разных значениях дисбаланса R :
 $1 - R = 0,25$ мм; $2 - R = 5$ мм; $3 - R = 20$ мм.
 Скорость ветра 7 м/с; рабочая точка: $a = 300000$ А/м; $b = 1000$ А·с/м

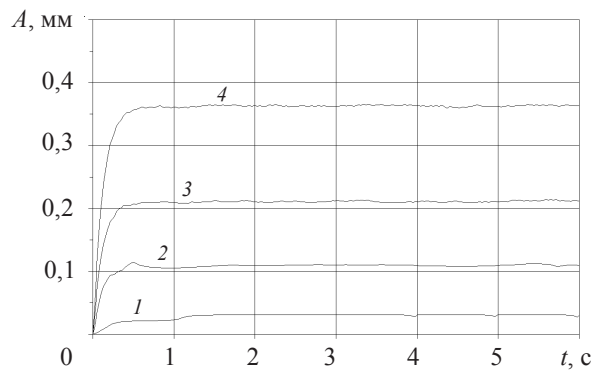


Рис. 4. Динамика смещений ротора при разных скоростях ветра:
 $1 - v = 2,5$ м/с, $2 - v = 8$ м/с, $3 - v = 15$ м/с, $4 - v = 18,5$ м/с.
 Дисбаланс $R = 0,25$ мм; рабочая точка: $a = 300000$ А/м; $b = 1000$ А·с/м

Динамические процессы, представленные на рис. 3 и 4, соответствуют раскрутке ротора до рабочей частоты $f = 1$ Гц с ускорением $0,3$ Гц/с.

Понизить уровень отклонений ротора при неизменных уровне дисбаланса и скорости ветра можно за счет выбора параметров управления из области устойчивости, в основном, пропорционального коэффициента системы управления a , характеризующего «жесткость» ЭМП. Способность радиальных ЭМП удерживать ро-

тор в рабочем диапазоне зазоров при разных значениях «жесткости» характеризуют кривые на рис. 5. Как и следовало ожидать, за счет увеличения «жесткости» ЭМП (параметра управления a) можно достичь существенного уменьшения уровня смещений ротора.

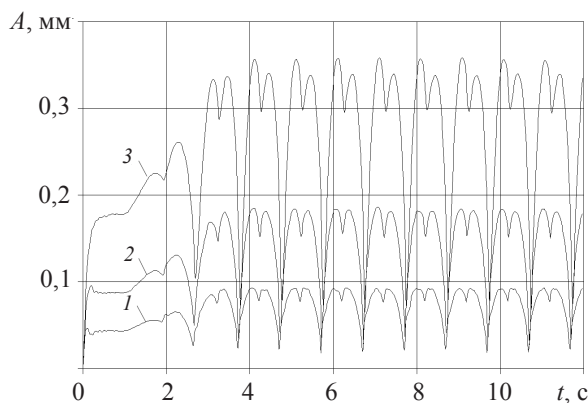


Рис. 5. Динамика смещений ротора при разных значениях «жесткости» ЭМП:
 $1 - a = 500000$ А/м, $2 - a = 300000$ А/м, $3 - a = 100000$ А/м.
 Скорость ветра 7 м/с, $R = 2,5$ мм, $b = 1000$ А·с/м

Таким образом, с помощью программного комплекса расчетного исследования динамики вертикально-осевой ВЭУ на ЭМП выполнен анализ динамики ротора в зависимости от основных регулярных эксплуатационных воздействий, которыми являются дисбаланс ротора и ветровая нагрузка. Показано, что используемая система управления справляется со своими основными задачами – удерживать ротор в заданных пределах при широком спектре внешних воздействий.

Список литературы

1. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. М.: Энергоатомиздат, 1983. 201 с.
2. Ветроэнергетические установки: Справочник. Ч. 2. Техничко-экономические характеристики установок и их узлов. М.: Информэлектро, 1993. 196 с.
3. Баклушин П.Г., Вашкевич К.П., Самсонов В.В. // Гидропроект: Сб. научн. тр. 1988. Вып. 129. С. 98–105.
4. Иванов И.И., Иванова Г.А., Перфилов О.Л. // Гидропроект: Сб. научн. тр. 1988. Вып. 129. С. 106–113.
5. Турян К.Дж., Стрикленд Дж.Х., Берг Д.Э. //Аэрокосмическая техника. 1988. №8. С. 105–121.
6. Галась М.И. и др. // Энергетическое строительство. 1991. №3. С. 33–37.
7. Горелов Д.Н., Кривоспицкий В.П. // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, №1. С. 163–167.
8. Соломин Е.В. //Альтернативная энергетика и экология. 2010. №1. С. 10–15.
9. Беляков П. ВЭУ с вертикальной осью вращения: сравнительная оценка технических решений и перспективы развития. <http://www.energyland.info/news-show-generaciya-52412>.
10. Bhatta P., Paluszek M.A., Mueller J.B. Individual blade pitch and camber control for vertical axis wind turbines // Proceeding of World Wind Energy Conference. 2008. 10 p.
11. Математическая модель ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки / М.Я. Николаев, В.Н. Литвинов, А.А. Киришин и др. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2011. Вып. 4(5). С. 2398–2400.
12. Алгоритм формирования заданной силы электромагнитных подшипников в системе

управления электромагнитного подвеса ротора / В.В. Знышев, М.Я. Николаев, Е.В. Кирюшина и др. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2010. Вып. 5(1). С. 138–141.

**MODELING THE DYNAMICS OF THE ELECTROMAGNETICALLY SUSPENDED
VERTICAL-AXIS WIND POWER PLANT**

**F.M. Mitenkov, V.F. Ovchinnikov, M.Ya. Nikolayev, E.V. Kiryushina, A.A. Kiryushin,
V.N. Litvinov, E.V. Fadeeva, A.S. Chistov**

The results of numerically investigating the dynamics of a flexible inhomogeneous electromagnetically suspended rotor of a vertical-axis wind power plant are presented. The results were obtained using a computer model accounting for the main factors affecting the dynamics of the rotor. The effectiveness of the power plant is demonstrated.

Keywords: vertical-axis wind power plant, flexible inhomogeneous rotor, computer model, numerically investigating the dynamics, operating system, electromagnetic suspension.