

УДК 534.01

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ДИНАМИКУ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОГО РОТОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ*

© 2016 г. **Митенков Ф.М., Овчинников В.Ф., Николаев М.Я.,
Кирюшина Е.В., Литвинов В.Н., Фадеева Е.В., Чистов А.С.**

*Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

minick@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 17.06.2015

Представлены результаты численных экспериментов по исследованию влияния скорости ветра на характер динамических процессов в вертикально-осевом роторе ветроэнергетической установки на электромагнитном подвесе. Компьютерная модель динамики ветроэнергетической установки учитывает наряду с основными факторами, влияющими на динамику ротора, взаимодействие со страховочными подшипниками. Показано, что эксплуатация ротора без касания статора может осуществляться в широком диапазоне скоростей ветра, включающем в себя режимы работы с ветровыми нагрузками, близкими к экстремальным значениям (штормовой ветер). При работе ветроэнергетической установки на электромагнитном подвесе в экстремальных режимах с касанием ротором страховочных подшипников возможно возникновение режима вращения ротора с высокочастотной прецессией центра ротора, при котором на контактирующие поверхности ротора и статора действуют силы, приводящие к аварийной ситуации.

Ключевые слова: ветровая нагрузка, ветроэнергетическая установка, компьютерная модель, контактное взаимодействие, прецессия центра ротора, скорость ветра, страховочный подшипник, электромагнитный подшипник.

Введение

Важные преимущества электромагнитного подвеса по сравнению с механическим – отсутствие трения и смазки, большая степень независимости от условий внешней среды и обслуживания – создают предпосылки использования электромагнитных подшипников (ЭМП) в ветроэнергетических установках (ВЭУ) [1–4].

В основном эксплуатационном режиме вертикальный ротор ветроэнергетичес-

* Выполнено при частичном финансировании Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8), Минобрнауки РФ (соглашение от 27.08.2013 № 02.В49.21.0003 между Минобрнауки РФ и ННГУ и государственное задание по проекту №2014/134 2226), РФФИ (гранты №13-08-00785а, №15-48-02391р_поволжье_а.

кой установки на электромагнитных подшипниках, вращаясь под действием ветровой нагрузки, колеблется в воздушном зазоре между ротором и страховочными подшипниками, расположенными на статоре ВЭУ и предотвращающими соударение ротора с конструктивными элементами (магнитами ЭМП, электрогенератором) при внешних воздействиях. Электронная система управления (СУ) ЭМП позволяет менять жесткость электромагнитных подшипников и демпфировать колебания ротора, поэтому в широком диапазоне изменения скоростей ветра ветроротор эксплуатируется без касания страховочных подшипников, обеспечивая бесконтактную работу, которая позволяет уменьшить износ конструктивных элементов ротора, вибрацию, шумность и энергопотери на трение. В экстремальных режимах со штормовым ветром ротор ВЭУ может касаться страховочных подшипников.

Особенности контактного взаимодействия ротора и страховочного подшипника обусловлены конструктивным исполнением ВЭУ: полый вертикальный ротор с закрепленными на нем лопастями, внутри него расположен неподвижный цилиндрический статор с катушками силовых обмоток радиальных ЭМП. При контакте ротора со страховочными подшипниками возможен режим вращения, сопровождающийся хаотическими соударениями ротора со страховочными подшипниками (режим ударного скольжения). Режим ударного скольжения является относительно безопасным для конструкции ротора и статора. Однако при неблагоприятных условиях может установиться режим вращения, при котором центр ротора движется с высокой угловой скоростью (прецессирует) в направлении вращения ротора. Такой режим высокоскоростной прецессии недопустим при эксплуатации ротора, так как в этом случае на контактирующие поверхности действуют нагрузки, приводящие к аварийной ситуации.

Задачей данной работы является расчетный анализ режимов динамики ротора ВЭУ на ЭМП при разных скоростях ветра. В результате анализа должны быть определены наиболее благоприятный для эксплуатации ВЭУ диапазон скоростей ветра с бесконтактным вращением ротора и максимальная (критическая) скорость ветра, при которой необходимо осуществить экстренную остановку ВЭУ для предотвращения аварии. Сложность динамики ротора и описания сил контактного взаимодействия при наличии нелинейностей в системе управления предполагает численное решение задачи.

Основные положения математической модели динамики ротора ВЭУ

Анализ динамики ротора базируется на численных исследованиях с использованием представленных в [2–6] математических моделей, адаптированных для случая воздействия на ротор ветровой нагрузки. Ось ротора при его центральном расположении в ЭМП совпадает с осью Ox прямоугольной системы координат $Oxyz$. Дискретная модель динамики ротора представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно обобщенных координат, роль которых выполняют коэффициенты разложения функций поперечных перемещений ротора по формам собственных колебаний $U_k(x)$. В матричной форме уравнения динамики ротора в поперечных направлениях Oy, Oz аналогичны. Для направления Oy уравнения имеют вид

$$m_0 \frac{d^2 \mathbf{a}}{dt^2} + m_0 \Omega_k \mathbf{a} = \mathbf{R}_a. \quad (1)$$

В этой записи \mathbf{a} – вектор обобщенных координат; K – количество форм собственных колебаний в аппроксимации решения; $\Omega_K = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_K^2)$ – диагональная матрица порядка K , элементами которой являются квадраты собственных частот ротора; m_0 – масса ротора, \mathbf{R}_a – вектор обобщенных сил.

В общем случае воздействие ветровой нагрузки характеризуется действием на ротор в направлении осей Ox , Oy и Oz зависящих от времени и пространственной координаты x распределенных сил $q_x(x, t)$, $q_y(x, t)$, $q_z(x, t)$. В правую часть матричного уравнения движения ротора (1) введен дополнительный вектор обобщенных сил, обусловленных действием ветровой нагрузки:

$$\mathbf{G}_a = \{G_a^k(t)\}, \quad G_a^k(t) = \int_0^l q_y(x, t) \cdot U_k(x) dx. \quad (2)$$

Здесь l – длина ротора.

Для внешних распределенных сил $q_x(x, t)$, $q_y(x, t)$, $q_z(x, t)$ при организации вычислительного процесса на каждом шаге интегрирования необходимо организовывать вычисление компоненты векторов обобщенных сил в соответствии с (2).

В используемом варианте расчетов динамики ветроротора реализован базовый сценарий силового воздействия. Предполагается, что на L участков ротора с номерами p_1, p_2, \dots, p_L действует зависящая от времени распределенная сила $\mathbf{q}(t)$, задаваемая тремя компонентами $q_x(t)$, $q_y(t)$, $q_z(t)$. В этом случае соотношения (2) для вычисления векторов обобщенных сил принимают вид

$$\mathbf{G}_a = q_y(t) \{m_k\}, \quad m_k = \sum_{n=1}^L \int_0^{l_{pn}} U_k(x) dx.$$

Здесь l_{pn} – длина участка ротора с номером p_n .

В каждом конкретном исследуемом динамическом режиме могут реализовываться несколько базовых силовых воздействий. Для гипотетической ВЭУ [2], являющейся объектом расчетного анализа, взаимное положение ротора и страховочного подшипника представлено на схеме рис. 1а. Внутренняя поверхность ротора является окружностью с радиусом $R = 590$ мм и с центром в точке S . Поверхность контакта страховочного подшипника моделируется окружностью радиуса $R_0 = 589,6$ мм с центром в точке O , являющейся началом системы координат Oyz . Номинальный зазор между ротором и статором, который реализуется в случае совпадения центров ротора и резервного подшипника, равен $R - R_0 = 0,4$ мм. Схема контактного взаимодействия ротора со статором представлена на рис. 1б.

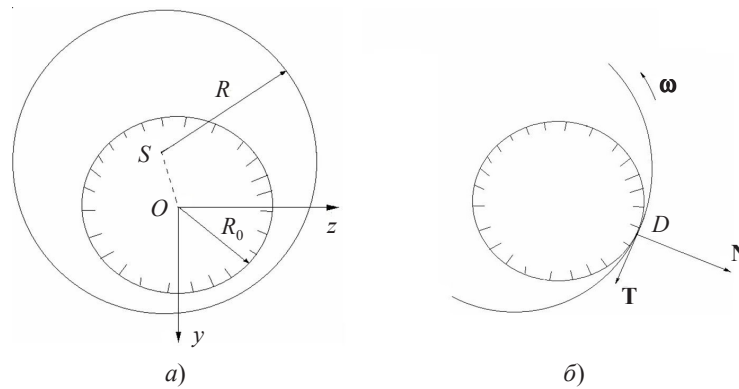


Рис. 1

В точке контакта D (используется точечная модель контакта) касательные к поверхности ротора и поверхности страховочного подшипника совпадают. При упругой модели контакта нормальная к поверхностям контакта сила взаимодействия N пропорциональна деформации d контактирующих элементов: $N = C \cdot d$, где C – жесткость контактного взаимодействия. Действующая на ротор нормальная сила N направлена от точки контакта в направлении от центра сечения ротора. В точке контакта возникает также сила T , направленная по касательной к поверхностям контакта, которая пропорциональна силе нормального взаимодействия и коэффициенту трения скольжения μ :

$$T = \mu \cdot N. \quad (3)$$

Направление касательной силы T , действующей на ротор, противоположно направлению скорости движения точки контакта ротора по отношению к точке контакта статора.

Касательная составляющая контактной силы (3) создает тормозящий момент $M_T = T \cdot R$ относительно оси вращения ротора. Угловая скорость вращения ротора ω описывается уравнением

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_B - M_C - M_T, \quad (4)$$

где I – момент инерции ротора относительно оси вращения, M_B – момент сил вращения, M_C – момент сил сопротивления.

Более подробно модель контактного взаимодействия вращающегося ротора на ЭМП с радиальными страховочными подшипниками и особенности ее компьютерной реализации приведены в работах [6, 7].

Математическая модель вертикально-осевой ВЭУ на ЭМП реализована в компьютерных кодах. Комплекс расчетных программ включает в себя следующие компьютерные модели: динамики сложного гибкого ротора на электромагнитном подвесе; системы управления электромагнитными подшипниками; сил разной физической природы, включая силы контактного взаимодействия ротора со страховочными подшипниками, в качестве которых использованы подшипники скольжения.

Исходные данные и результаты расчетного анализа

Рассматривается гипотетический ветроротор Дарье [2] с двумя радиальными и одним осевым ЭМП высотой 20 м, диаметром описываемой лопастью окружности 10 м, с тремя лопастями и массой 11000 кг.

При расчетах динамики основным возмущающим фактором, действующим на ветроротор, предполагалась усредненная по времени ветровая нагрузка, зависящая от скорости ветра. Согласно консервативной методике оценки параметров стационарного режима ВЭУ [3], при номинальной скорости ветра $V_0 = 11,8$ м/с и номинальной частоте вращения $f_0 = 1,5$ Гц сила ветровой нагрузки составляет $F_0 = 5,4$ кН при развиваемой механической мощности ~ 100 кВт.

На ветроротор, кроме ветровой нагрузки, действуют силы, обусловленные дисбалансом: дисбаланс ротора моделировался как равномерный односторонний с радиусом смещения центра масс ротора от оси вращения $r = 2,5$ мм.

Динамика ротора на ЭМП существенно зависит от характеристик электромагнитных подшипников и системы управления электромагнитными силами ЭМП. В настоящих исследованиях использовались данные о конструкции ЭМП и характе-

ристикх СУ ЭМП экспериментального стенда ММР (масса ротора на ЭМП около 1000 кг, высота 10 м), предназначенного для исследования особенностей динамики ротора на электромагнитном подвесе [8]. СУ ЭМП с помощью пропорционально-дифференциального регулятора на основании результатов показаний датчиков перемещений ротора формирует необходимую электромагнитную силу в ЭМП путем изменения управляющего напряжения, подаваемого на обмотки магнитов ЭМП.

В расчетах исследовалось влияние на динамику скорости ветра V и коэффициента трения скольжения μ . Моделировалось скачкообразное увеличение скорости ветра от исходной номинальной величины V_0 через 0,6 с от начала процесса. Возмущение задавалось по горизонтальной оси y , по оси z возмущения нет. Коэффициент трения скольжения μ варьировался в диапазоне от максимальной величины (сталь по стали) 0,3 до значения 0,05. Жесткость контактного взаимодействия задавалась постоянной величиной $C = 4 \cdot 10^{10}$ Н/м. Угловая скорость вращения ротора изменялась только за счет момента торможения M_T из уравнения (4), действующего на ротор при взаимодействии его со страховочным подшипником.

Результаты расчетного исследования динамики ветроротора, представленные на рисунках, получены для расчетного варианта с коэффициентом трения скольжения $\mu = 0,3$.

На рис. 2а и 2б приведены соответственно осциллограммы отклонения центра ротора (в направлении действия ветровой нагрузки) и траектории перемещения центра ротора в сечении верхнего радиального ЭМП при номинальной скорости ветра $V_0 = 11,8$ м/с (коричневая кривая) и при скорости ветра $V = 21,2$ м/с (красная кривая). В диапазоне скоростей ветра от нуля до 21,2 м/с (штормовой ветер в 9 баллов по шкале Бофорта) обеспечивается бесконтактная работа ротора и практически нулевой износ конструктивных элементов ротора и статора.

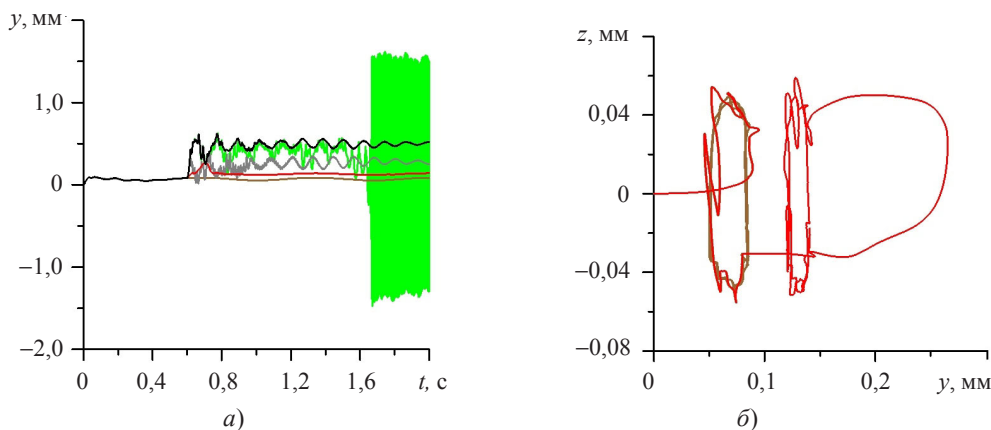


Рис. 2

При скорости ветра $V = 21,4$ м/с отклонения центра ротора по оси y достигают величины зазора между ротором и страховочным подшипником 0,4 мм, и ротор в первый раз касается статора. В диапазоне скоростей ветра от 21,4 м/с до 32,0 м/с наблюдается режим ударного скольжения с хаотическим касанием ротором верхнего страховочного подшипника. При скорости ветра 32,0 м/с отклонения центра ротора в направлении действия ветровой нагрузки в сечении верхнего ЭМП превышают 0,4 мм (рис. 2а, черная кривая); нижний страховочный подшипник (рис. 2а, серая кривая) с ротором практически не соприкасается.

При увеличении скорости ветра до критической величины, равной 32,2 м/с, резко изменяется вид динамического процесса (рис. 2а, зеленая кривая). Сила ветровой нагрузки при критической скорости ветра приводит к резкому росту сил трения между ротором и страховочным подшипником, и ротор начинает прецессировать со значительной угловой скоростью в сторону вращения с проскальзыванием.

На рис. 3а приведены траектории перемещения центра ротора в сечении верхнего (зеленая кривая) и нижнего (синяя кривая) ЭМП при скорости ветра 32,2 м/с, которые представляют собой спирали, раскручивающиеся в направлении вращения ротора. Ротор выходит на близкий к стационарному режим вращения, который называют также режимом обкатки [9]. Прецессия центра ротора имеет место в обоих радиальных ЭМП. Вследствие податливости конструкций ротора и статора в рамках линейной модели контакта радиус орбиты центра ротора увеличивается приблизительно до 1,5 мм. Резко растет момент M_T , тормозящий ротор. Стремительно снижается частота вращения ротора f (рис. 3б, зеленая кривая) по сравнению с вариантом с докритической скоростью ветра 32,0 м/с (рис. 3б, черная кривая). Траектории перемещения центра ротора в верхнем (черная кривая) и нижнем (серая кривая) ЭМП для докритического варианта даны на рис. 3а.

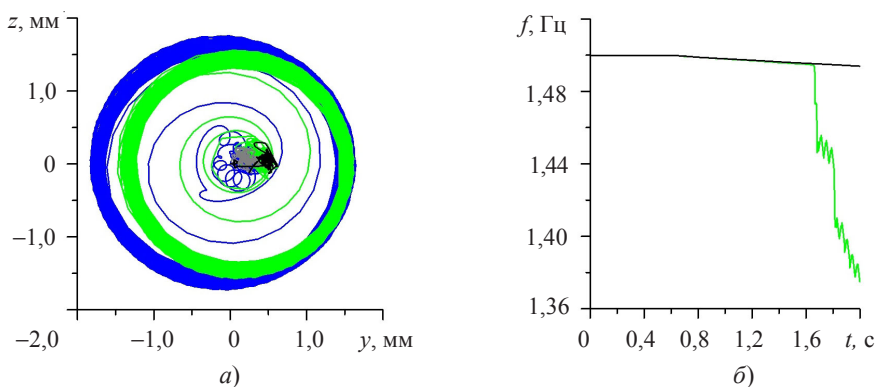


Рис. 3

Частота прецессии центра ротора в режиме обкатки составляет несколько сотен герц, что во много раз превышает собственную частоту вращения ротора f , на контактирующие поверхности действуют силы $\sim 10^4$ кН.

Расчеты динамики ротора с уменьшенным коэффициентом трения скольжения показали, что уменьшение касательной составляющей T из (3), действующей на ротор в точке контакта, приводит к незначительному возрастанию критической величины скорости ветра, при которой ветроротор выходит на режим высокочастотной прецессии (при $\mu = 0,15$ критическая скорость равна 32,4 м/с, а при $\mu = 0,05$ она составляет 32,6 м/с).

Заключение

Основной эксплуатационный режим ВЭУ на электромагнитном подвесе, при котором ротор бесконтактно вращается вокруг неподвижного статора, включает в себя широкий диапазон ветровых нагрузок. В этот диапазон входят скорости ветра до 17 м/с, соответствующие нормальным условиям эксплуатации, и скорости до 21 м/с, соответствующие условиям работы, приближенным к экстремальным. Ветро-

ротор сохраняет работоспособность при кратковременных штормовых порывах ветра до 30 м/с. В регионах с высоким ветровым потенциалом (например, в прибрежных районах Севера и Востока России) устойчивая бесконтактная работа ротора ВЭУ может дать экономический эффект благодаря существенному увеличению электрической мощности ВЭУ.

При скорости ветра свыше 30 м/с для ВЭУ на электромагнитном подвесе существует опасность аварии с разрушением конструкций ротора и статора, обусловленная высокочастотной прецессией ротора. Компьютерная модель позволяет выполнить оценку критической величины скорости ветра, при которой необходимо осуществить экстренную остановку ВЭУ для предотвращения аварии.

Список литературы

1. Wang N.X., Zhang J.G., Ding G.P. Influence of magnetic bearing stiffness on rotor in wind turbine generator. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 150. P. 57–62.
2. Митенков Ф.М., Овчинников В.Ф., Николаев М.Я., Кирюшина Е.В., Чистов А.С., Литвинов В.Н., Фадеева Е.В. Моделирование динамики вертикально-осевой ветроэнергетической установки на электромагнитном подвесе. *Проблемы прочности и пластичности*. 2012. Вып. 74. С. 184–189.
3. Mitenkov F.M., Chistov A.S., Ovchinnikov V.F., Nikolaev M.Ya., Kiryushina E.V., Litvinov V.N., Fadeeva E.V., Savikhin O.G. Electromagnetic suspension in vertical axial wind-driven generators. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. Vol. 44, No 3. P. 195–199.
4. Николаев М.Я., Литвинов В.Н., Кирюшин А.А., Овчинников В.Ф., Фадеева Е.В. Математическая модель ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. Вып. 4(5). С. 2398–2400.
5. Овчинников В.Ф., Николаев М.Я., Кирюшина Е.В., Кирюшин А.А., Литвинов В.Н., Фадеева Е.В., Чистов А.С., Митенков Ф.М., Кодочигов Н.Г. Модель динамики гибкого неоднородного ротора на электромагнитных подшипниках. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2012. Вып. 4(1). С. 171–176.
6. Митенков Ф.М., Овчинников В.Ф., Николаев М.Я., Кирюшина Е.В., Литвинов В.Н., Фадеева Е.В., Чистов А.С. Модель динамики гибкого ротора на электромагнитном подвесе при сейсмических воздействиях с учетом взаимодействия со страховочными подшипниками. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77, №1. С. 5–13.
7. Николаев М.Я., Овчинников В.Ф., Кирюшина Е.В., Чистов А.С. Программный продукт «Программа для ЭВМ расчета контактных взаимодействий ротора на электромагнитном подвесе со страховочными подшипниками – программа «ВРОСТ-01». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616014, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.05.2015.
8. Drumov I.V., Kodochigov N.G., Belov S.E., Znamensky D.S., Baxi C.B., Telengator A., Razi J. Studies of the electromagnetic suspension system for the GT-MHR turbo machine rotor model. *Proceedings of HTR 2010*. Prague, Czech Republic. October 18–20, 2010. No 41. P. 1–7.
9. Никифоров А.Н. Обобщенная математическая модель ротора Джеффкотта – Лавала с учетом его проскальзывания при контакте и несоосности со статором. *Вестник научно-технического развития*. 2012. №5(57). С. 41–56.

References

1. Wang N.X., Zhang J.G., Ding G.P. Influence of magnetic bearing stiffness on rotor in wind turbine generator. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 150. P. 57–62.
2. Mitenkov F.M., Ovchinnikov V.F., Nikolaev M.Ya., Kiryushina E.V., Chistov A.S., Litvinov V.N., Fadeeva E.V. Modelirovanie dinamiki vertikal'no-osevoy vetroenergeticheskoy ustanovki na elektromagnitnom podvese. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2012. Vyp. 74. S. 184–189.
3. Mitenkov F.M., Chistov A.S., Ovchinnikov V.F., Nikolaev M.Ya., Kiryushina E.V., Litvinov V.N., Fadeeva E.V., Savikhin O.G. Electromagnetic suspension in vertical axial wind-driven

- generators. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. Vol. 44, No 3. P. 195–199.
4. Nikolaev M.Ya., Litvinov V.N., Kiryushin A.A., Ovchinnikov V.F., Fadeeva E.V. Matematicheskaya model' rotora vertikal'no-osevoy vetroenergeticheskoy ustanovki. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. Vyp. 4(5). S. 2398–2400.
5. Ovchinnikov V.F., Nikolaev M.Ya., Kiryushina E.V., Kiryushin A.A., Litvinov V.N., Fadeeva E.V., Chistov A.S., Mitenkov F.M., Kodochigov N.G. Model' dinamiki gibkogo neodnorodnogo rotora na elektromagnitnykh podshipnikakh. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2012. Vyp. 4(1). S. 171–176.
6. Mitenkov F.M., Ovchinnikov V.F., Nikolaev M.Ya., Kiryushina E.V., Litvinov V.N., Fadeeva E.V., Chistov A.S. Model' dinamiki gibkogo rotora na elektromagnitnom podvese pri seysmicheskikh vozdeystviyakh s uchetom vzaimodeystviya so strakhovochnymi podshipnikami. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2015. T. 77, №1. S. 5–13.
7. Nikolaev M.Ya., Ovchinnikov V.F., Kiryushina E.V., Chistov A.S. *Programmnyy produkt "Programma dlya EVM rascheta kontaktnykh vzaimodeystviy rotora na elektromagnitnom podvese so strakhovochnymi podshipnikami – programma "VROST-01"*. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2015616014, data gosudarstvennoy registratsii v Reestre programm dlya EVM 29.05.2015.
8. Drumov I.V., Kodochigov N.G., Belov S.E., Znamensky D.S., Baxi C.B., Telengator A., Razvi J. Studies of the electromagnetic suspension system for the GT-MHR turbo machine rotor model. *Proceedings of HTR 2010*. Prague, Czech Republic. October 18–20, 2010. No 41. P. 1–7.
9. Nikiforov A.N. Obobshchennaya matematicheskaya model' rotora Dzheffkotta – Lavalya s uchetom ego proskal'zyvaniya pri kontakte i nesoonosti so statorom. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*. 2012. №5(57). S. 41–56.

**THE EFFECT OF THE WIND VELOCITY ON THE DYNAMICS
OF AN ELECTROMAGNETICALLY SUSPENDED VERTICAL-AXIS ROTOR
OF A WIND POWER PLANT**

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

*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The results of numerical experiments on investigating the wind velocity effect on the nature of dynamic processes in an electromagnetically suspended vertical axis rotor of a wind power plant are presented. The computer model of the dynamics of the wind power plant takes into account, in addition to the main factors affecting the dynamics of the rotor, the interaction with the safety bearings. The exploitation of the rotor without contacting the stator is shown to be possible in a wide range of wind velocities, including working regimes with wind loads close to extremal values (storm wind). In extremal regimes of the electromagnetically suspended wind power plant, when the rotor comes in contact with the safety bearings, there may arise a rotation regime of the rotor with high precession of the rotor center, where the contacting surfaces are loaded with forces leading to accidents.

Keywords: wind load, wind power plant, computer model, contact interaction, precession of the rotor center, wind velocity, safety bearing, active magnetic bearing.