

УДК 621.548.01

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОТОРА ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

© 2011 г.

**М.Я. Николаев, В.Н. Литвинов, А.А. Кирюшин,
В.Ф. Овчинников, Е.В. Фадеева**

НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

minick@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Для вертикально-осевой ветроэнергетической установки мегаваттного класса разработана математическая модель динамики вертикального неоднородного ротора на электромагнитных подшипниках. В модели учтены практически все известные факторы, влияющие на динамику ветроротора. Результаты моделирования могут послужить исходной базой для конструирования и исследования динамики машин различного назначения с роторами как на электромагнитных, так и на других опорах в теплоэнергетике, гидроэнергетике, транспорте газа, в космосе и др.

Ключевые слова: вертикально-осевая ветроэнергетическая установка, гибкий ротор, математическая модель, электромагнитный подшипник.

**Выбор варианта конструкции
ветроэнергетической установки**

К настоящему времени в мире большая часть проектируемых и работающих ветроэнергетических установок (ВЭУ) относится к двум типам: горизонтально-пропеллерные, у которых ось ротора расположена по направлению ветрового потока, и вертикально-осевые ВЭУ [1–8] с осью, ортогональной потоку.

На всем пути развития ветроэнергетики основное внимание уделялось горизонтально-осевым (пропеллерным) ветроустановкам, т.к. до недавнего времени считалось, что для вертикально-осевых ВЭУ невозможно получить отношение максимальной линейной скорости рабочих органов (лопастей) к скорости ветра больше единицы (для горизонтально-осевых пропеллерных ВЭУ это отношение достигает более 5:1) и что предельный коэффициент использования энергии ветра у вертикально-осевых ВЭУ ниже, чем у горизонтально-осевых пропеллерных. Однако оказалось, что эти выводы справедливы не для всех типов вертикальных ВЭУ [3–8]. Например, для вертикального ротора Дарье максимальное отношение линейной скорости рабочих органов к скорости ветра может быть 6:1 и выше, а коэффициент использования энергии ветра не ниже, чем у горизонтально-осевых пропеллерных ВЭУ. К этому следует добавить, что эффективность преобразования энергии определяется не столько линейной скоростью лопастей (входной параметр), сколько

связанной с ней достигаемой линейной скоростью и нагрузками выходных элементов преобразования энергии ветра, то есть зависит от технических характеристик всей схемы преобразования. Эффективность работы вертикально-осевых ветроустановок принципиально не зависит от направления ветра, в связи с чем отпадает необходимость во всех системах и механизмах ориентации на ветер.

Анализ состояния и тенденций развития ветроэнергетики показал, что в настоящее время интенсивно развивается направление создания ветроэнергетических установок мегаваттного класса. Наиболее перспективной на этом направлении и подлежащей исследованию представляется концепция вертикально-осевой ветроэнергетической установки. Главную задачу – увеличение коэффициента использования энергии ветра и снижение энергопотерь – предполагается решать с помощью концентрации энергии ветра, улучшенных схемы преобразования энергии ветра, конструкции ветроротора и за счет применения электромагнитных подшипников (ЭМП) в качестве опор ротора вертикально-осевой ВЭУ.

Электромагнитный подвес позволяет повысить экологическую безопасность, КПД и ресурс ВЭУ за счет следующих следствий его применения:

– бесконтактная работа (отсутствие износа, уменьшение загрязнений, вибраций, шумности и энергопотерь на трение, соответственно, увеличение диапазона рабочих скоростей ветра);

– отсутствие системы масляной смазки (снижение затрат на вспомогательные системы, исключение утечек смазки при высоких температурах и ее загустения при низких);

– решение с помощью системы управления электромагнитным подвесом проблем устойчивости и прохождения зон резонанса при вращении;

– надежность и относительно невысокие капитальные затраты и стоимость обслуживания.

Для решения возникающих при проектировании ВЭУ задач (выявления возможностей увеличения эффективности; улучшения ряда параметров конструкции ВЭУ, существенно влияющих на динамику вращения ротора; разработки методов управления электромагнитным подвесом, при которых обеспечивается успешное прохождение критических частот вращения ротора и др.) разработана математическая модель динамики вертикального неоднородного гибкого ветроротора на электромагнитном подвесе.

Математическая модель динамики вертикального неоднородного гибкого ветроротора

Модель динамики ветроротора разработана на основе уравнений движения стержней и ротора с распределенными параметрами.

При разработке уравнений математической модели ротора в качестве базовой расчетной схемы принят прямой неоднородный осесимметричный стержень. Стержень разбивается на серию однородных участков, в пределах каждого из которых все характеристики неизменны. В качестве базового элемента участка используется стержень с кольцевым нормальным сечением. Вращение ротора характеризуется угловой скоростью, изменяющейся по заданному закону.

Полная модель вертикального ротора на ЭМП ВЭУ включает в себя: механическую модель ротора; модели электромагнитных подшипников, системы управления ЭМП; сил разной физической природы.

В математической модели учтены: неоднородность ротора по длине; распределение массы в нормальных сечениях участков ротора; нелинейная связь между вертикальными и поперечными колебаниями ротора; внутреннее рассеяние энергии в роторе; возможность соединения валов разных частей ротора гибкой муфтой; возмож-

ность изгибных и продольных колебаний ротора; взаимодействие ротора с гибким неоднородным статором; гироскопические силы; силы от дисбаланса; аэродинамические силы; электромагнитные силы; несоосность разных частей ротора; разница положения ЭМП и соответствующего ему датчика; динамические характеристики нелинейной системы управления ЭМП (нелинейная зависимость электромагнитных сил от тока в обмотках ЭМП и перемещений); отличие координат расположения датчиков и соответствующих ЭМП; инерция электромагнитов; частота съема информации с датчиков положения ротора в пространстве; время формирования управляющего напряжения; зона нечувствительности и гистерезиса системы управления; ограничения на максимум тока в обмотках ЭМП; угол отклонения от горизонтали опорного диска в осевом ЭМП. По количеству учтенных факторов, влияющих на динамику ветроротора, разработанная модель превосходит известные в мире.

Результаты моделирования могут послужить базой для конструирования и исследования машин различного назначения с роторами как на электромагнитных, так и на других опорах в теплоэнергетике, гидроэнергетике, транспорте газа, в космосе и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и РФФИ (грант № 10-08-00882 а). Соавтором и научным руководителем работы является Ф.М. Митенков.

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.

A MATHEMATICAL MODEL OF THE ROTOR OF A VERTICAL-AXIS WIND POWER PLANT*М.Я. Nikolayev, V.N. Litvinov, A.A. Kiryushin, V.F. Ovchinnikov, E.V. Fadeeva*

A mathematical model of the dynamics of a vertical electromagnetically suspended inhomogeneous rotor of a mega-watt vertical-axis wind power plant has been developed. The model accounts for practically all the known factors that influence the dynamics of a wind rotor. The results of the modeling can be used as a basis for designing and investigating the dynamics of machines of various purposes with electromagnetically suspended or otherwise supported rotors for thermal power engineering, hydro-power engineering, gas transport, space engineering and other fields.

Keywords: vertical-axis wind power plant; flexible rotor, mathematical model, electromagnetic bearing.