

УДК 000.0

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЯМЫМИ ЛОПАСТЯМИ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОРОТОРА ДАРЬЕ

С. А. ДОВГИЙ **, В. П. КАЯН *, В. А. КОЧИН *, А. Г. ЛЕБЕДЬ **

* Институт гидромеханики НАН Украины

** Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Киев

Получено 15.06.2009

Представлены результаты исследований по определению влияния периодического изменения угла установки лопасти в течение одного оборота модели ветрогенератора Дарье с прямыми лопастями на мощностные и моментные характеристики ветрогенератора, а также на величину ветровой нагрузки на вал ветрогенератора. Исследования проводились путем модельного эксперимента малой модели ветрогенератора в гидротрубе. Показана способность ветрогенератора с управляемыми лопастями самозапускаться при весьма малых скоростях набегающего потока, возможность значительного увеличения коэффициентов использования энергии потока и крутящего момента на валу, а также существенно снижения аэродинамической нагрузки на вал ветрогенератора по сравнению с аналогичным ветрогенератором с жестко фиксированными лопастями.

Наведені результати досліджень щодо визначення впливу періодичної зміни кута установки лопасті протягом одного обороту моделі вітрогенератора Дар'є з прямими лопастями на потужнісні і моментні характеристики вітрогенератора, а також на величину вітрового навантаження на вал вітрогенератора. Дослідження проводилися шляхом модельного експерименту малої моделі вітрогенератора в гідротрубці. Показані здатність ротора з керованими лопастями самозапускатися при вельми низьких швидкостях набігаючого потоку, можливість значного збільшення коефіцієнтів використання енергії потоку і обертового моменту на валу, а також істотного зниження аеродинамічного навантаження на вал вітрогенератора у порівнянні з аналогічним вітрогенератором з жорстко фіксованими лопастями.

The results of researches by definition of influence of periodic change of installation blade angle during one turn of wind turbine (Darrieus type) model with straight blades on powering and moment characteristics of wind turbine, and also on magnitude of wind loading on the wind turbine shaft are shown. Researches carried out by modelling experiment of small wind turbine model in a hydrotray. Ability of a wind turbine model with operated blades to selfstart at rather low flow velocity in hydrotray are shown. An opportunity of substantial growth of operating ratios of flow energy and a torque on wind turbine model shaft and essential decrease of hydrodynamic load on wind turbine model shaft in comparison with an analogous model with rigidly fixed blades are shown also.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно прогнозу Программы развития ООН, всесторонне обоснованного модельными экспериментами и технико-экономическими расчетами, новые и возобновляемые источники энергии в XXI столетии займут главенствующее или одно из ведущих мест в глобальном топливно-энергетическом балансе Земли [1]. Одним из таких неисчерпаемых источников энергии на Земле является ветер. Проведенные во многих странах исследования показали, что современные ветроэнергетические установки (ВЭУ) могут эффективно использоваться даже в регионах со среднегодовой скоростью ветра около 5 м/с.

Наиболее распространены на сегодняшний день ВЭУ с горизонтальной осью вращения ветродвигателя. Однако, как прогнозировали специалисты фирмы "Боинг" еще в 80-тых годах прошлого столетия, такие ВЭУ из-за особенностей их компоновки не смогут по мощности превысить цифру в 5–10 МВт [2]. Такие ограничения возникли из-за существовавшего на конец прошлого века кон-

структивного предела длины лопасти примерно в 60 м. Это, в свою очередь, ограничивает возможности снижения стоимости квт-часа до конкурентоспособной величины. Предельная длина лопасти была достигнута в 2005 году, когда в Германии была введена в эксплуатацию ВЭУ мощностью 5 МВт [3]. В то же время, мощность ВЭУ с вертикальной осью вращения (ВОВ) ветрогенератора (типа ротора Дарье) может достигать, по оценкам экспертов, 15–30 МВт. Недавно в США опубликован проект такой ВЭУ мощностью 100 МВт. Можно перечислить некоторые преимущества таких ВЭУ: независимость функционирования от направления ветрового потока, возможность перехода от консольного крепления оси ветрогенератора к двухопорному, возможность размещения потребителя энергии (электрогенератор, насос) в основании ветроустановки (снижаются требования к высоте, прочности и жесткости опоры), упрощение конструкции лопастей и снижение их материалоёмкости (а значит и стоимости), уменьшение шумности и площади земельного участка для размещения ВЭУ одинаковой мощности и т. д. [4].

Все более возрастающий интерес ученых и конструкторов всего мира к ветроэнергетическим установкам такого типа подтверждается тем, что на состоявшейся в Канаде в июне 2008 года 8-ой Всемирной конференции по ветроэнергетике в секции "Конструкция ветроустановок" все доклады (из США, Канады, Саудовской Аравии и др.) были посвящены ветроустановкам с ВОВ (аббревиатура VAWT в англоязычной литературе – сайт www.wvec 2008.com).

Одним из главных недостатков ветророторов с ВОВ с жестко фиксированными относительно траверс лопастями является высокая скорость ветрового потока, при которой происходит самозапуск ротора во вращение и более высокая скорость вращения ветроротора для достижения приемлемой величины коэффициента использования энергии потока.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Высокая скорость самозапуска ветроротора с ВОВ вызвана тем, что фиксированные жестко относительно горизонтальных траверс вертикальные лопасти ротора в статическом состоянии не могут создать при обтекании их ветровым потоком малой скорости (4–5 м/сек) необходимой величины и нужного направления действия аэродинамических сил на лопастях и, тем самым, достаточного пускового момента на валу. При наличии же у ветроротора механизма управления положением лопастей существует возможность повернуть лопасти относительно траверс таким образом, чтобы изменить величину и направление действия возникающей на них аэродинамической силы. Это позволяет осуществить самозапуск ветроротора даже при малых скоростях ветра или затормозить его при очень больших скоростях ветра. Кроме того, управление положением лопастей позволяет значительно улучшить рабочие характеристики такого ветроротора [5–6], снизить в несколько раз величину аэродинамического сопротивления ветроротора [7–8].

Следует отметить, что когда рассматриваются вопросы управления лопастями ветроротора с ВОВ, то речь идет о роторе с прямыми лопастями, продольная ось которых параллельна вертикальному валу. Расчеты с применением и импульсной, и вихревой моделей показали, что при равной величине рабочей площади ($S = 2Rl$, где l – длина лопасти и R – радиус ее вращения относительно центральной оси ветроротора) ветроротор с прямыми лопастями по отношению к классическому ротору Дарье с изогнутыми в диаметральной пло-

скости лопастями имеет на 15–20% выше коэффициент использования энергии потока C_p , который в основном характеризует эффективность ветроротора [9].

Различают два основных вида управления лопастями – пассивный и активный. При пассивном управлении лопастями каждая лопасть ветроротора имеет возможность поворота относительно траверсы, и если ось поворота будет находиться вблизи передней кромки, то аэродинамические силы (в основном подъемная сила) будут стараться повернуть лопасть в сторону уменьшения угла атаки α . Если поставить на траверсе какие-то упругие ограничители поворота лопасти, то появляется возможность пассивно регулировать углы атаки лопасти в зависимости от скорости вращения ветроротора. Эту же функцию (если ось поворота лопасти находится вблизи центра давления профиля лопасти) могут выполнять специальные грузы, которые при превышении рабочей скорости вращения ветроротора (т. е. опасно возрастает центростремительное ускорение) также поворачивают лопасти в сторону уменьшения угла α . Подробный обзор конструкций таких устройств, а также результатов испытаний и модели натурального образца ветроротора с пассивным управлением лопастей можно найти в [10].

При активном управлении лопастями углы их поворота относительно траверс в каждой точке круговой траектории определяются специальным механизмом. Первые попытки активного управления лопастями ветроротора были сделаны еще в конце 70-х годов прошлого века. Так, в [11] представлены результаты испытаний в аэродинамической трубе ветроротора с ВОВ с синусоидальным колебанием лопасти относительно некоторого центрального положения на траверсе с помощью кулачкового механизма. Задавая разную амплитуду колебаний, авторы показали, что при низких значениях коэффициента быстроходности λ_p более эффективны колебания лопасти с большой угловой амплитудой, а при более высоких значениях λ_p эффективны колебания с малой амплитудой. Однако авторы не дали никаких предложений по способу реализации своих результатов.

В работе [12] также представлены результаты испытаний ветроротора с кулачковым механизмом управления лопастями. В этом случае применялся ряд кулачков различной формы, что позволило исследовать работу модели ветроротора с различной формой и амплитудой угловых колебаний лопастей. Показано, что для различных скоростей ветрового потока оптимум отдаваемой ветроротором полезной мощности достигался при использовании ку-

лачков различной формы, однако автором не сделано никаких предложений, как данный механизм может быть использован в реальной ВЭУ.

За последние 30 лет было зарегистрировано достаточно много патентов (ориентировочно до сотни, согласно доступных нам источников) на механизмы управления лопастями ветророторов с ВОВ – от самых простых до достаточно сложных конструктивно. В то же время, ни один из авторов патентов не говорит об оптимальных законах управления предлагаемыми ими устройств.

В Институте гидромеханики НАНУ в начале 2000-х годов был разработан конструктивно простой механизм управления лопастями такого ветроротора. Для определения оптимальных законов управления лопастями проведен цикл исследований моделей ветророторов в гидрлотке, результаты которых показали высокую эффективность применения такого механизма [13–14]. Предложенные конструктивные варианты исполнения ВЭУ с таким механизмом и оптимальные законы управления лопастями защищены патентами Украины [15–17].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения исследований в Институте гидромеханики НАНУ была создана специальная экспериментальная установка и несколько моделей ветророторов различной геометрической конфигурации [13]. Модель ветроротора (рис. 1) с вертикальным валом 1 размещалась в прямоугольной рамке 2, которая шарнирно крепилась к вертикальным стойкам жесткой рамы 4 на гидрлотке 5. Рабочее сечение потока в гидрлотке в месте размещения модели ветроротора составляло $S_1 = 0.32 \text{ м}^2$. Прямоугольная рамка 2 посредством вертикального рычага 6 и горизонтального поводка 7 соединялась с тензодинамометром 8, жестко закрепленным на раме 4. Модель ветроротора состояла из двух параллельных друг другу дисковых траверс 9, соединяющего их вала 1 и лопастей 10, продольные оси которых были параллельны оси вала 1. Верхний конец вертикального вала 1 соединялся с гибким валом 11, свободный конец которого с калиброванной катушкой крепился на боковой стенке гидрлотки 5 горизонтально. На верхней поперечине рамки 2 крепилось устройство 12 для измерения скорости вращения ротора, скорость воды в рабочем сечении контролировалась постоянно датчиком 13, закрепленном на жесткой раме 3.

Были изготовлены три модели ветроротора с

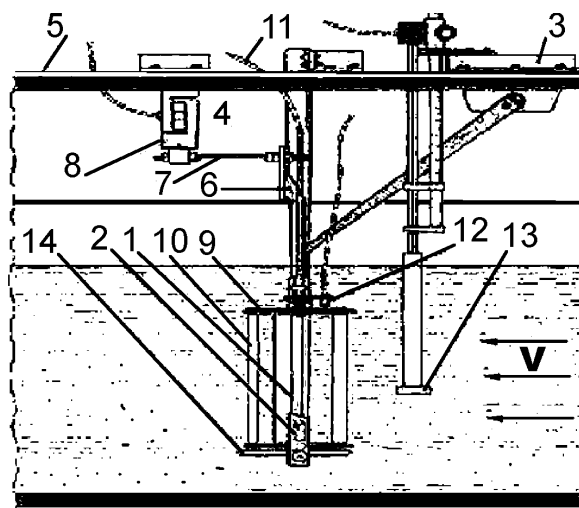


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования моделей ветророторов в гидрлотке

прямоугольными в плане лопастями. В качестве профиля лопасти был выбран осесимметричный профиль $\text{NACA} - 0015$. Угол установки хорды профиля лопасти к касательной окружности вращения при жесткой фиксации лопастей был выбран равным $+4^\circ$ [18]. Модели роторов N 1, 2 и 3 отличались длиной лопастей l и величиной радиуса R установки передней оси лопасти на траверсах модели. Испытывались модели ветроротора с числом лопастей 2, 3 и 4 [13–14].

Механизм изменения угла установки лопасти 10 (см. рис. 1) относительно траверсы ветроротора в течение одного оборота состоял из диска 14 с круговой канавкой, который размещался под нижней дисковой траверсой 9. На первом этапе исследований центр этой круговой канавки был смещен относительно центра вращения лопастей ветроротора на величину эксцентриситета $e = \text{const}$ [13–15]. В дальнейшем был сделан механизм для перемещения этого диска относительно нижней поперечины рамки 2 вдоль линии действия набегающего потока на заданное расстояние (исследования проводились с одной моделью с $l = 0.3 \text{ м}$ и $R = 0.0875 \text{ м}$). Лопастей 10 модели ветроротора на нижнем торце имели две оси (длина хорды лопасти $b = 0.05 \text{ м}$, расстояние между осями $= 0.36 b$). Передняя ось устанавливалась шарнирно на верхней и нижней траверсах, а задняя ось проходила свободно сквозь щель в нижней траверсе и имела на конце шарикоподшипник, который размещался в канавке нижнего диска 14. Таким образом, данный механизм при каждом определенном значении эксцентриситета e обеспечивал строго опре-

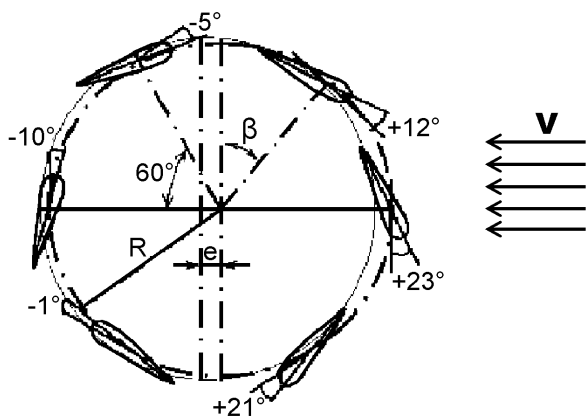


Рис. 2. Изменение углов установки управляемой лопасти модели ветрогенератора относительно траверсы при величине относительного эксцентриситета $\epsilon = e/R = 0.06$

деленный закон изменения угла установки каждой лопасти во времени с угловыми колебаниями лопастей относительно передней оси с частотой, равной частоте вращения модели ветрогенератора. Пример изменения величины угла установки лопасти (между линией хорды профиля лопасти и касательной к круговой траектории в точке размещения передней оси лопасти) при относительном эксцентрисите $\epsilon = e/R = 0.06$ показан на рис. 2.

Для проведения необходимых измерений при исследовании параметров вращения ветрогенератора использовалась двухуровневая автоматизированная измерительная система сбора и обработки экспериментальных данных. Измерительная система состояла из трёх измерительных каналов: 1) канал измерения средней скорости потока воды в рабочей части гидролотка, 2) канал измерения мгновенной величины силы гидродинамического сопротивления модели ветрогенератора, 3) канал измерения частоты вращения модели ветрогенератора. В канале измерения средней скорости потока в качестве первичного преобразователя использовалась специально спроектированная трубка гидродинамического напора, соединённая с дифференциальным датчиком давления фирмы "Motorola" MPXV5004DP. В канале измерения мгновенной величины силы гидродинамического сопротивления в качестве первичного преобразователя использовался тензометрический динамометр. В канале измерения частоты вращения ротора в качестве первичного преобразователя использовались специально спроектированные магнитоэлектрические датчики. Величина рабочего момента на валу модели ветрогенератора определялась весом грузов, которые поднимались вертикально

при наматывании нитки на катушку с горизонтальной осью, соединённую с валом модели ветрогенератора гибким валом 11 (см. рис.1).

Относительная приведенная погрешность измерений составляла $0.4 \div 0.8\%$ с доверительной вероятностью $p = 0.90$ в полосе исследуемых сигналов $0 \div 5$ Гц. Запись экспериментальных данных и их первичная обработка выполнялись на компьютере 1-го уровня с помощью программы PowerGraph 2.1. Средняя за время эксперимента скорость потока V перед моделью ветрогенератора задавалась регулированием расхода воды в головной части гидролотка. Крутящий момент M на валу модели ротора задавался с помощью калиброванных грузов. При заданных величинах скорости потока V , нагрузочного крутящего момента M и эксцентриситета e проводилась запись частоты вращения ротора n , величины общего гидродинамического сопротивления R_x модели ветрогенератора и реальная скорость течения в рабочем сечении гидролотка. Время одной реализации эксперимента составляло $20 - 30$ с с частотой дискретизации сигналов 100 Гц. Таким образом, объем выборок каждой реализации составлял $2000 - 3000$ единичных измерений.

Далее с использованием программы Excel составлялись расчётные таблицы с исходными параметрами, а именно e , V , M и n , которые позволяли для каждого записанного режима работы ротора вычислить его рабочие характеристики λ_p , C_p , C_m и C_x .

Коэффициент быстроходности ротора λ_p определялся как

$$\lambda_p = 2\pi nR/V, \quad (1)$$

где n – число оборотов модели ветрогенератора в секунду; $R = \text{const}$ – радиус окружности, по которой движется передняя ось профиля лопасти модели ветрогенератора, V – скорость набегающего на модель ветрогенератора потока воды, измеренная во время записи рабочего режима. Следует отметить, что для ортогонального ротора (т. е. ось вращения ротора перпендикулярна направлению скорости набегающего потока) коэффициент быстроходности λ_p есть соотношение окружной скорости лопасти $V_{\text{окр}} = 2\pi nR$ и скорости набегающего на ротор потока V .

Коэффициент использования энергии потока C_p определялся как

$$C_p = 2P/\rho V^3 S, \quad (2)$$

где $P = 2\pi nM$ есть полезная мощность, развиваемая ротором; ρ – плотность воды; $S = 2Rl -$

площадь гидродинамического (рабочего) сечения ротора.

Коэффициент крутящего момента C_m определялся как

$$C_m = C_p / \lambda_p. \quad (3)$$

Величины среднего и максимального коэффициентов гидродинамического сопротивления модели ветроротора $C_{x_{cp}}$ и $C_{x_{max}}$ находили по формулам

$$C_{x_{cp}} = 2R_{x_{cp}} / \rho V^2 S, \quad (4)$$

$$C_{x_{max}} = 2R_{x_{max}} / \rho V^2 S. \quad (5)$$

Коэффициент пульсаций нагрузки на валу ветроротора определялся как

$$K_d = (C_{x_{max}} - C_{x_{cp}}) / C_{x_{cp}}. \quad (6)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Рабочие характеристики модели ветроротора

Испытания модели ветроротора с механизмом плавного изменения эксцентриситета (величина относительного эксцентриситета ϵ изменялась от 0 до 0.14) показали, что при малой скорости потока в гидролотке $V = 0.3 - 0.4$ м/с при отсутствии эксцентриситета ($e = 0$, лопасти ротора относительно траверс неподвижны) модель ветроротора не самозапускалась. При смещении управляющего диска на некоторую величину e ветроротор начинал вращаться, причём, чем больше была величина эксцентриситета e , тем при меньшей скорости набегающего потока происходил самозапуск ветроротора. С увеличением нагрузочного момента M на валу модели ротора (при $V = \text{const}$) у всех роторов число оборотов n уменьшалось, причём степень этого уменьшения зависела от величины эксцентриситета и конструкции моделей. Зависимость величины n от M в большинстве случаев была близка к линейной (рис. 3). На рис. 4 представлены рабочие характеристики (коэффициенты C_p и C_m) модели ветроротора с механизмом управления лопастями (величина эксцентриситета e изменялась от 0 до 12 мм с шагом 3 мм). Хорошо видно, что в диапазоне величин коэффициента быстроходности $\lambda_p = 1.2 - 1.6$ увеличение относительного эксцентриситета от 0 до 0.06 приводит к увеличению коэффициентов C_p и C_m в 2 и более раз. Картину изменения этих коэффициентов при максимально достигнутой в гидролотке скорости потока $V = 0.7$ м/с при изменении эксцентриситета e от 0 до 8 мм с шагом 1 мм можно увидеть в [8].

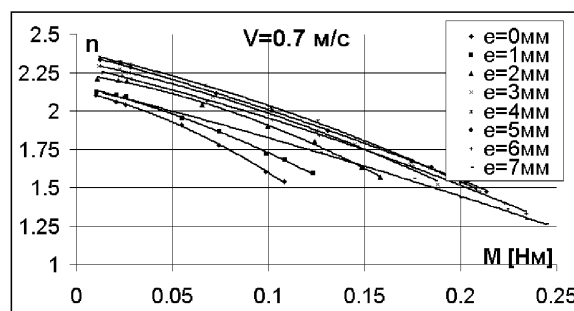
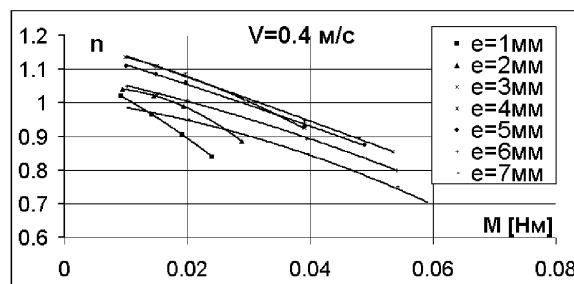
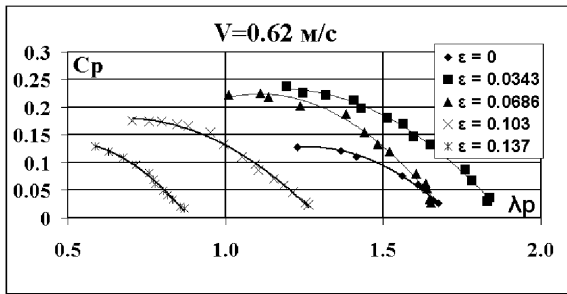
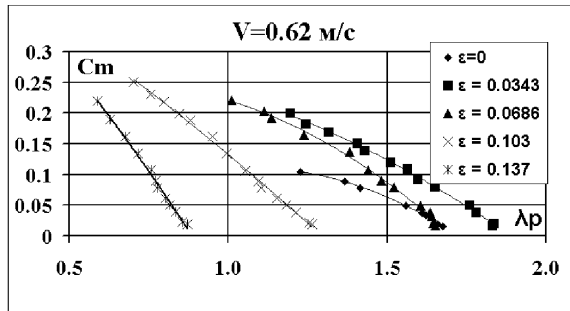


Рис. 3. Зависимости величины числа оборотов модели ветроротора n от величины нагрузочного момента M на валу и величины эксцентриситета e при различных скоростях набегающего потока

Более иллюстративны для показа степени влияния величины эксцентриситета e , задаваемого предложенным механизмом управления лопастями, на рабочие характеристики ветроротора являются графики зависимостей $C_p(\epsilon)$, показанные на рис. 5 для двух различных скоростей V набегающего потока. Характер кривых на графиках рис. 5 убедительно показывает, что для любой величины коэффициента быстроходности λ_p существует оптимальная величина эксцентриситета управляющей окружности механизма управления лопастями, при которой достигается максимум эффективности ветроротора. Общий вид кривых на графиках $C_m(\epsilon)$ такой же, как и на рис. 5. Установлено, что чем меньше величина коэффициента быстроходности ветроротора (т. е. чем меньше скорость вращения ветроротора), тем при большей величине ϵ_{opt} достигается максимум коэффициентов C_p и C_m . Поскольку зависимости скорости вращения ветроротора n от величины ϵ (при фиксированных величинах развиваемой на валу ветроротора мощности P) имеет точно такой же вид, как и на рис. 5, существует возможность за счет изменения величины эксцентриситета e регулировать также и скорость вращения ветроротора.



а



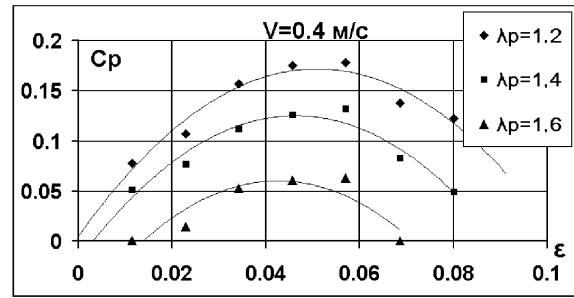
б

Рис. 4. Зависимости величин коэффициентов использования энергии потока C_p (а) и крутящего момента C_m (б) модели ветроротора от величины коэффициента быстроходности λ_p при различных величинах относительного эксцентриситета ϵ

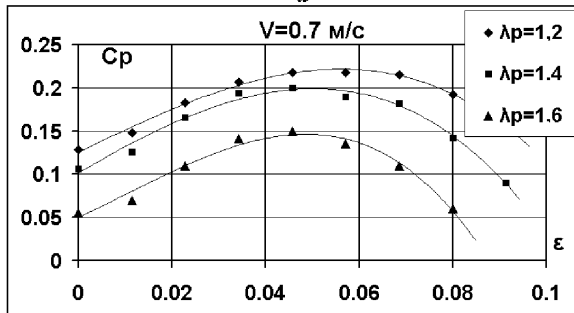
3.2. Полуэмпирический расчет характеристик ветроротора

По заданным геометрическим параметрам модели ветроротора был проведен расчет кинематики движения отдельной лопасти при различных режимах работы ветроротора и на его основе проделан качественный анализ мгновенных сил и моментов, действующих как на отдельную лопасть, так и на ротор в целом.

Известно, что при движении профиля лопасти по круговой траектории на его наветренной поверхности наблюдается постоянное изменение вдоль хорды угла атаки α [10], поэтому для упрощения расчетов за угол атаки на рассматриваемом профиле принимался угол между хордой профиля лопасти (с учетом угла установки лопасти относительно траверсы, задаваемого смещением управляющего диска) и вектором относительной скорости $V_{отн}$ в центре давления профиля. Вектор относительной скорости определялся как векторная разность скорости V невозмущенного потока, набегающего на ротор, и линейной скорости $V_{окр}$ движения профиля по окружности. При заведо-



а



б

Рис. 5. Зависимости величины коэффициента использования энергии потока C_p модели ветроротора от величины относительного эксцентриситета ϵ при скоростях набегающего потока $V = 0.4$ м/с (а) и $V = 0.7$ м/с (б) при различных значениях коэффициента быстроходности λ_p

мой условности такого квазистационарного подхода он позволяет провести качественный анализ величин возникающих на лопасти гидродинамических сил.

На рис. 6 показаны мгновенные углы атаки α лопасти в зависимости от азимутального угла поворота ротора β (см. рис. 2) относительно центральной оси вращения модели ветроротора при $V = 0.7$ м/с, коэффициенте быстроходности $\lambda_p = 1.2$ и величинах относительного эксцентриситета $\epsilon = 0; 0.03; 0.06; 0.09; 0.12$ (см. рис. 5, б). Начальная точка графика $\beta = 90^\circ$ соответствует крайнему боковому положению лопасти, когда она идет навстречу набегающему потоку, точка $\beta = 0^\circ$ соответствует крайнему положению лопасти вверх по потоку, точка $\beta = -90^\circ$ соответствует крайнему боковому положению лопасти, когда она идет вдогонку за набегающим потоком, и точка $\beta = -180^\circ$ соответствует крайнему положению лопасти вниз по потоку.

Анализ рис. 6 показывает, что при $\epsilon = 0$ (ротор с жестко фиксированными относительно траверс лопастями) значительные участки круговой траектории профиль лопасти проходит при закритических углах атаки (т. е. при отрывном обте-

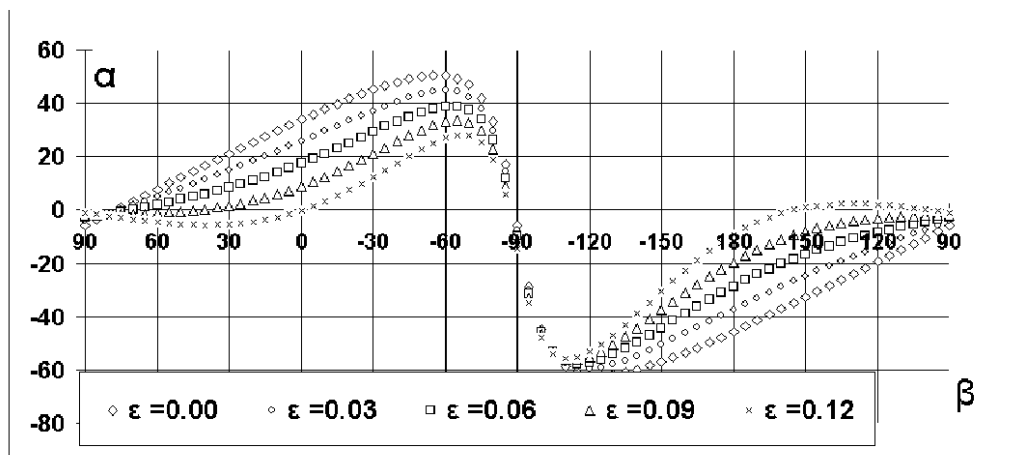


Рис. 6. Зависимости величины угла атаки α для единичной лопасти модели ветроротора от азимутального угла поворота β относительно центральной оси вращения модели ветроротора $\lambda_p = 1.2$

кании). На этих участках возникающая на лопасти подъёмная сила, дающая положительный вклад в общий момент вращения ротора, резко падает, а лобовое сопротивление, дающее (как правило) отрицательный вклад, резко возрастает, что приводит к значительному снижению величины аэродинамического качества профиля $K = C_y/C_x$. Смещение управляющего диска до некоторой оптимальной величины (например $\epsilon = 0.06$, как показано на рис. 5, б) приводит к возникновению переменного угла установки профиля лопасти на траектории ее движения, что, в свою очередь, приводит к уменьшению протяженности участков траектории с закритическими углами атаки лопасти и увеличению протяженности участков траектории с докритическими углами атаки. Это, в свою очередь, приводит к существенному возрастанию величины момента вращения ветроротора. Дальнейшее увеличение эксцентриситета (кривая $\epsilon = 0.09$ на рис. 6) приводит к снижению эффективности работы ветроротора, при этом появляются участки траектории, где углы атаки близки к нулю. Подъёмная сила на этих участках очень мала и профиль практически работает вхолостую. При $\epsilon = 0.12$ на траектории даже появляются отдельные участки, где углы атаки меняют знак на противоположный (т. е. подъёмная сила меняет направление действия на 180° и ее тангенциальная составляющая начинает тормозить ротор).

Для более наглядного рассмотрения картины влияния параметров управления лопастью ветроротора на его рабочие характеристики, с использованием квазистационарного подхода были рассчитаны подъёмная сила и лобовое сопротивление

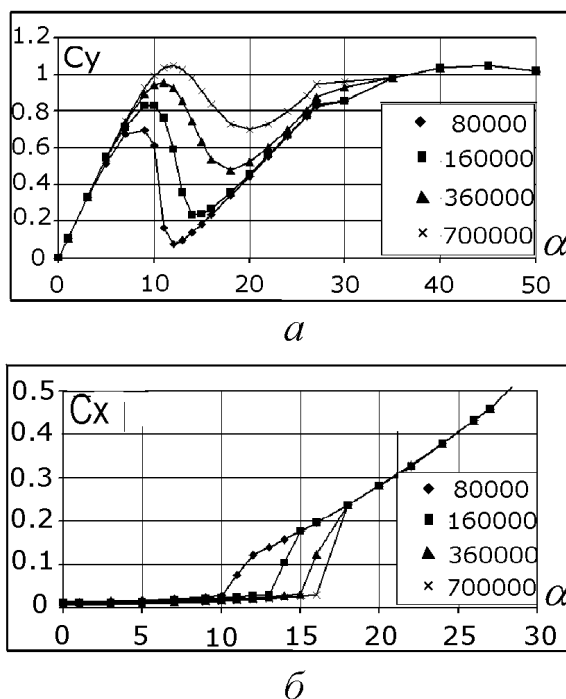
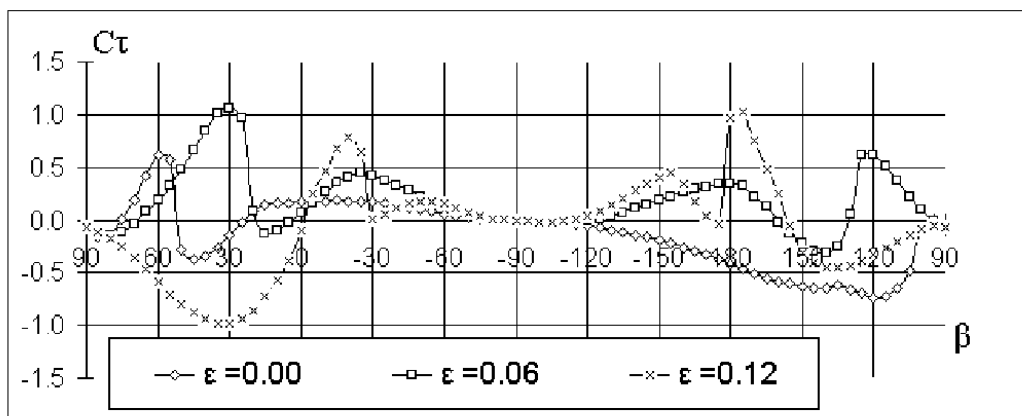


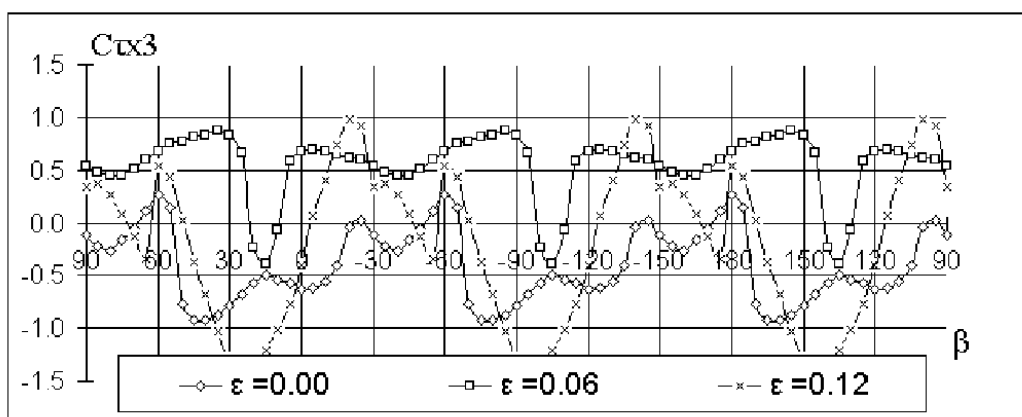
Рис. 7. Зависимости $C_y(\alpha)$ для профиля NACA0015 при числах Рейнольдса $Re = (0.8 - 7) \times 10^5$ [19]

лопасти в различных точках ее траектории движения, а также сумма проекций этих сил на касательную (тангенциальная составляющая C_τ) и нормаль (радиальная составляющая C_n) к окружности.

Известно, что величина числа Рейнольдса $Re = Vb/\nu$, при котором работает крыло, существенно влияет на характер зависимости $C_y(\alpha)$, осо-



а



б

Рис. 8. Зависимости величины коэффициента C_τ для единичной лопасти (а) и для трехлопастной модели ветрогенератора (б) от азимутального угла β поворота лопасти относительно центральной оси вращения модели ветрогенератора

бенно в области закритических углов атаки. На рис. 7 показаны зависимости коэффициента C_y от угла атаки α профиля NACA 0015 при различных числах Re , полученные в аэродинамической трубе с малой турбулентностью лаборатории Sandia [19]. Следует отметить, что данные для $Re = (0.8 - 1.6) \times 10^5$ получены авторами [19] экстраполяцией от экспериментальных данных при $Re = (0.36 - 2.00) \times 10^6$. Максимальное число Re для лопасти модели ветрогенератора в наших экспериментах составляло $(0.8 - 1.0) \times 10^5$, поэтому для расчета были взяты данные с кривой $C_y(\alpha)$ рис. 7 при $Re = 80000$.

Результирующая аэродинамическая сила, действующая на лопасть, определялась по формуле

$$\vec{F} = \rho V^2 S / 2 \vec{C}_F = \rho S / 2 V_{отн} (C_x(\alpha) \vec{V}_{отн} + C_y(\alpha) \vec{V}_n), \quad (7)$$

где ρ – плотность среды; V – скорость невозмущенного потока; $S = bl$ – площадь лопасти; \vec{C}_F – безразмерная результирующая сила; $V_{отн}$ – величина относительной скорости; $\vec{V}_{отн}$ – вектор относительной скорости; \vec{V}_n – вектор, нормальный к вектору $\vec{V}_{отн}$ и равный по модулю $V_{отн}$ (т. е. тот же вектор, но повернутый на 90°).

На рис. 8,а представлена зависимость коэффициента тангенциальной силы C_τ (проекция \vec{C}_F на касательную к окружности) от азимутально-

го угла поворота β при $\lambda_p = 1.2$. Именно эта касательная составляющая результирующей силы и создает момент вращения ротора. Хорошо видно, что при $\epsilon = 0$ результирующая сила создает положительный вращающий момент только на наветренной части круговой траектории и значительный тормозящий момент на подветренной части траектории.

Со смещением управляющего диска вниз по потоку значительно возрастает величина создаваемого лопастью крутящего момента на наветренной части траектории, и даже на подветренной части траектории при оптимальной (для этого случая) величине $\epsilon = 0.06$ участки, где лопасть создает тормозящий момент, почти исчезают. При дальнейшем увеличении эксцентриситета работа ветроротора становится менее эффективной. Лопасть начинает создавать тормозящий момент и на некоторых участках наветренной части траектории, что не может в достаточной мере компенсироваться некоторым увеличением положительного крутящего момента на подветренной части траектории. Отметим, что результаты расчета достаточно хорошо совпадают с результатами проведенного эксперимента.

На рис. 8, б представлены результаты расчета по этой же методике суммарной тангенциальной силы для трехлопастного ротора. За счет сложения тангенциальных сил от трех лопастей с разностью фаз в 120° формируются четко видимые три положительных двойных пика суммарного крутящего момента. Со смещением управляющего диска в сторону оптимального положения эти пики значительно вырастают в ширину и по амплитуде, превращаясь в почти ровную линию с тремя небольшими провалами. Понятно, что это приводит к значительному росту общего крутящего момента на валу ротора. Однако при дальнейшем увеличении эксцентриситета положительные пики как бы "оседают", провалы увеличиваются и общий момент падает до нуля и даже до отрицательных значений (в этом случае в эксперименте происходила остановка модели ветроротора).

Полученные результаты расчетов позволяют глубже понять картину обтекания ветроротора с управляемыми лопастями, включая поведение интегральных характеристик ротора при изменении эксцентриситета. Примененная методика расчета может быть также использована при разработке в первом приближении перспективных законов управления для проектируемых ветророторов с последующей их корректировкой после экспериментальной проверки.

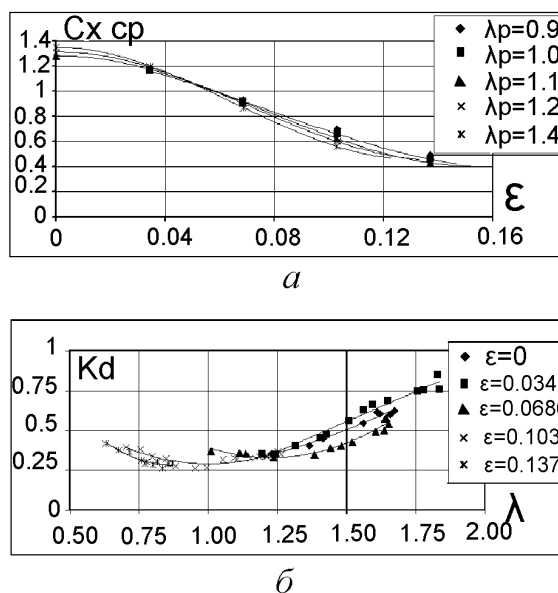


Рис. 9. Влияние величины относительного эксцентриситета ϵ на величину средней гидродинамической нагрузки на вал модели ветроротора (а) и на ее пульсационную составляющую (б) при $V = 0,62$ м/с

3.3. Гидродинамическое сопротивление ветроротора

Измерения величины гидродинамического сопротивления R_x модели ветроротора показали, что управление лопастями ветроротора приводит к достаточно большому снижению гидродинамической нагрузки на вал ротора.

На рис. 9, а показаны зависимости величины коэффициента среднего гидродинамического сопротивления $C_{x_{cp}}$ от величин относительного эксцентриситета ϵ и коэффициента быстроходности λ_p , полученные при постоянной скорости набегающего потока $V = 0.62$ м/с. Оказалось, что все экспериментальные точки на графике, полученные при разных величинах коэффициента λ_p , достаточно хорошо аппроксимируются практически одной кривой, причем имеются явно выраженные величины максимума сопротивления (при $\epsilon = 0$) и минимума (при $\epsilon = 0.15 \div 0.16$), при этом величина $C_{x_{cp}}$ снижается более чем в 3 раза.

Кроме того, существенно улучшаются условия работы вала ветроротора, так как с увеличением ϵ при постоянной скорости потока значительно увеличивается величина максимального крутящего момента на валу с одновременным некоторым уменьшением скорости вращения ветроротора (т. е. и коэффициента быстроходности ветро-

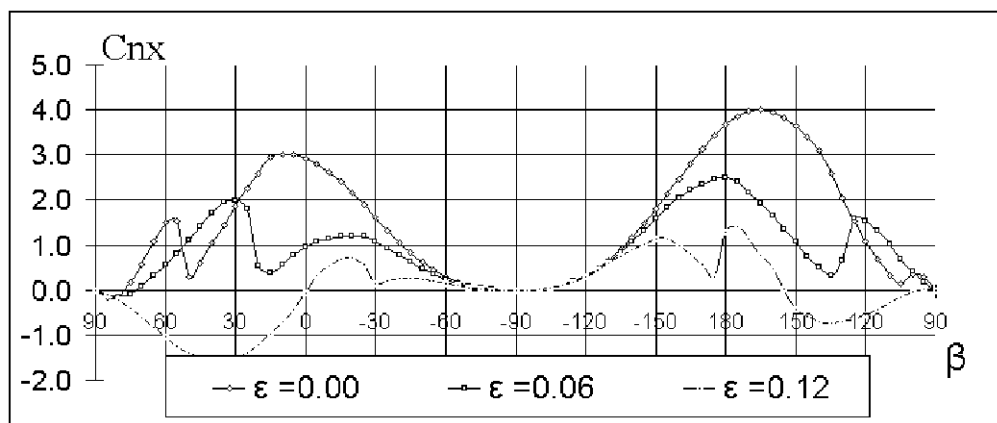


Рис. 10. Зависимости величины проекции радиальной составляющей C_n безразмерной результирующей силы C_F на направление набегающего на модель ветроротора потока (сопротивление ветроротора) для единичной лопасти модели ветроротора от азимутального угла поворота β относительно центральной оси вращения модели ветроротора при $\lambda_p = 1.2$ и различных величинах ϵ

ротора λ_p). Это, в свою очередь, как показывает график на рис. 9,б, приводит к снижению в несколько раз динамических пульсаций нагрузки на валу ветроротора, т. е. величины коэффициента K_d . При этом наблюдается явно выраженный минимум величины коэффициента пульсаций нагрузки K_d (при $\lambda_p = 0.8 \div 1$ и при относительном эксцентриситете $\epsilon = 0.10-0.13$). На рис. 10 результаты расчета по описанной в разделе 3.2 методике (для $\lambda_p = 1.2$) величин радиальной составляющей C_n безразмерной результирующей силы C_F для единичной лопасти показаны как проекция этой силы на направление набегающего на модель ветроротора потока, т. е. по сути это сопротивление ветроротора. Хорошо видно, как с увеличением эксцентриситета управляющей окружности механизма управления лопастями быстро уменьшается величина гидродинамического сопротивления модели ветроротора. Это хорошо совпадает с результатами эксперимента, представленного на рис.9, а, где при $\epsilon = 0.06$ сопротивление модели ветроротора уменьшается на 25%, а при $\epsilon = 0.12$ – в три раза. Нужно отметить также, что на некоторой части траектории при больших величинах относительного эксцентриситета ϵ лопасть даже создает тягу, направленную против набегающего потока (при β от 80 до 10 градусов на рис. 10). Это, кстати подтверждается результатами исследований подобной нашей модели ветроротора, представленных в [20].

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты исследований модели ветроротора с активным управлением лопастями на траектории их кругового движения показали возможность значительного увеличения его мощностных и моментных характеристик. В то же время, следует отметить, что в этой работе не ставилась цель получить на маломасштабной модели ветроротора абсолютно максимальные значения коэффициентов C_p и C_m , а только лишь выяснить, насколько при равных геометрических параметрах и одинаковой скорости набегающего потока можно повысить рабочие характеристики ветроротора с управляемыми лопастями относительно такого же ветроротора с жестко фиксированными лопастями. Мы показали, что даже управление лопастями по весьма простой схеме позволяет в несколько раз улучшить характеристики ветроротора, значительно снизить периодические нагрузки на валу ветроротора. Однако анализ закономерностей периодического изменения угла атаки на лопасти ветроротора показал, что, несмотря на увеличение протяженности участков траектории, на которых происходит доотрывное обтекание профиля лопасти, на наветренной части траектории остаются весьма значительные участки, где углы атаки лопасти превышают 15–20 градусов, т. е. на лопасти появляется отрыв и характеристики профиля лопасти далеки от оптимальных (рис.7). Кроме того, поскольку лопасть совершает угловые колебания относительно точки на центральной оси, отдаленной от носика профиля примерно на $0.3 b$, на носике профиля появляется дополнительная ско-

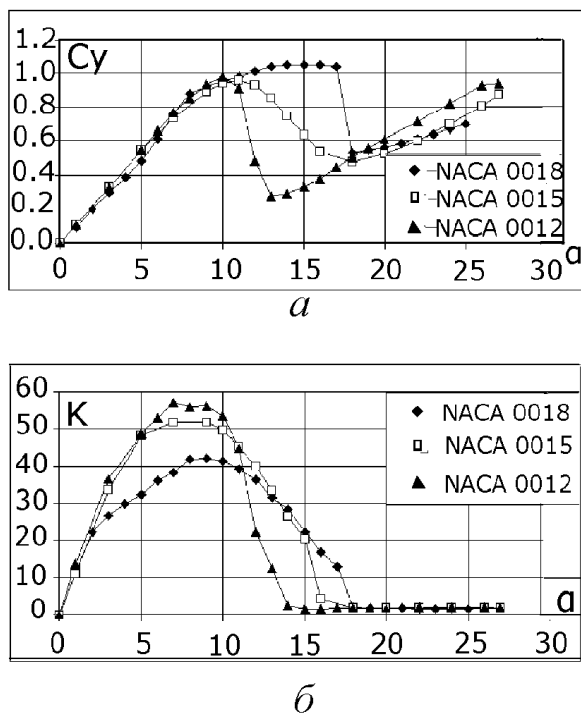


Рис. 11. Зависимости величин коэффициента подъемной силы C_y (а) и аэродинамического качества K (б) от величины угла атаки α для симметричных профилей серии NACA различной толщины ($Re = 3 - 3.6 \times 10^5$)

рость, направленная перпендикулярно хорде профиля, что меняет картину обтекания профиля.

Надо отметить, что толщина симметричного профиля NACA в 15% была выбрана нами как наиболее часто упоминающаяся в литературе по ветророторам с ВОВ [6, 9, 10]. Однако имеются также мнения о том, что для ветророторов с жестко фиксированными лопастями следует применять более толстые профили, которые могут обеспечить самостарт ветроротора [10, 21].

На рис. 11 показаны зависимости величины коэффициента C_y и аэродинамического качества K для профилей NACA 0012 и NACA 0015 [19] для $Re = 3.6 \times 10^5$ и NACA 0018 [22] для $Re = 3 \times 10^5$. Видно, что если у профилей с толщиной 0.12 b и 0.15 b максимум C_y достигается у обоих примерно при $\alpha = 10^\circ$, то для более толстого профиля максимум C_y достигается в диапазоне величин $\alpha = 12 - 17^\circ$ (рис. 11, а). Однако с точки зрения максимального аэродинамического качества предпочтительнее оказываются более тонкие профили (рис. 11, б). Поэтому выбор профиля NACA 0015 для ветроротора с ВОВ вполне оправдан и при активном управлении лопастями необходимо при-

менять такой закон поворота лопасти относительно траверсы, чтобы при тех величинах коэффициента быстроходности λ_p , при которых достигается максимальная величина коэффициента C_y , на большей части рабочих участков траектории движения лопасти обеспечивались оптимальные величины углов атаки, для чего в дальнейшем управляющую дорожку следует применять не с круговой, а с иной формой траектории.

1. Долженко Г. Вітер має працювати // Урядовий кур'єр.- 2007.- No.219.- С. 17.
2. Лятхер В. Второе пришествие ветряка.- Наука и жизнь: 1991, No.5.- 26-30 p.
3. Seidel M., Gosswein J. Advances in Offshore Wind Turbine Technology // Wind Energy - Proceedings of the Euromech Colloquium.- Berlin -Springer.- 2006.- С. 287-291.
4. Денисенко О. Г., Козловский Г. А., Федосенко Л. П., Осадчий А. И. Преобразование и использование ветровой энергии.- Киев: Техника, 1992.- 176 с.
5. Avallone E. A., Baumeister T. Standard Handbook for Mechanical Engineers.- 9-th Ed: McGraw Hill, 1978.- 645 p.
6. Islam M., Fartaj A., Carriveau R. Analysis of the Design Parameters related to a Fixed-pitch Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine // Wind Engineering.- 2008.- 32, No.5.- P. 491-507.
7. Kayan V. P., Kochin V. A. Optimization of Wind Loads and Operating Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbines with the Control Mechanism of Blades // Environmental effects on buildings, structures, materials and people.- Lublin University of Technology, Poland.- 2007.- P. 229-240.
8. Kayan V. P., Kochin V. A., Lebid O. G. Studying the Performance of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Models with Blade Control Mechanism // International Journal of Fluid Mechanics Research.- 2009.- 36, No.2.- P. 154-165.
9. Marini M., Massardo A., Sotta A. Performances of vertical axis wind turbines with different shapes // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.- 1992.- 39.- P. 83-93.
10. Kirke B. K. Evaluation of Self-Starting Vertical Axis Wind Turbines for Stand-Alone Applications.- PhD Thesis: Griffith University, Australia.- 1998 p. 338
11. Grylls W., Dale B., Sarre P. E. A Theoretical and Experimental Investigation into the Variable Pitch Vertical Axis Wind Turbine // Proc. 2nd Int. Symposium on Wind energy Systems.- Amsterdam.- 1978, Oct 3-6.- P. 101-118.
12. Brulle R. V. Giromill Wind Tunnel Tests and Analysis.- Proc 3rd Biennial Conf/Workshop on Wind Energy Conversion Systems: Washington, DC, 1977, Sept 19-21.- p. 775-783
13. Довгий С. А., Каян В. П. Исследование гидроаэродинамики моделей ветророторов с вертикальной осью вращения // Прикладная гидромеханика.- 2004.- 6, No.3.- С. 76-80.
14. Dovgy S., Kayan V., Kochin V. Experimental Researches of Characteristics of Windrotor Models with Vertical Axis of Rotation // Wind Energy - Proceedings of the Euromech Colloquium.- Berlin, Springer.- 2006.- С. 183-186.

15. Бойко П. М., Глушко В. М., Довгий С. О., Каян В. П., Пархісенко В. М., Циганюк А. І. Ротор вітросилової установки // Патент України №58189А МПК F03D 7/06.– 2003.– No.7.– С. 4.107.
16. Каян В. П., Довгий С. О., Бойко П. М., Лебідь О. Г. Вітросилова установка // Патент України №16097А на корисну модель МПК F03D 3/00 F03D 7/06.– 2006.– No.7.– С. 5.174.
17. Гребеніков В. В., Довгий С. О., Каян В. П., Кочин В. А. Вітросилова установка // Патент України №84319С МПК F03D 3/00, F03D 7/06.– 2008.– No.19.– С. 3–87.
18. Гульий С. В., Еремеев И. Д., Крашаница Ю. А., Усик Ю. Ф., Чмовж В. В. Аэродинамическая оптимизация масштабной модели вертикально-осевого ветродвигателя // Вісник Донбаської ДАБА 1, Вплив вітру на будинки і споруди.– 2001.– 29, No.4.– С. 149–153.
19. Sheldahl R. E., Klimas P. C. Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines.– Sandia Report: SAND80-2114, 1981.– 120 p.
20. Iosilevskii G, Levy Y. Experimental and Numerical Study of Cyclogiro Aerodynamics // AIAA Journal.– 2006.– 44, No.12.– P. 2866–2870.
21. Islam M., Ting D. S-K., Fartaj A. Design of a Special-purpose Airfoil for Smaller-Capacity Straight-Bladed VAWT // Wind Engineering.– 2007.– 31, No.6.– P. 401–424.
22. Timmer W. A. Two-dimensional low-Reynolds number wind tunnel results for airfoil NACA 0018 // Wind Engineering.– 2008.– 32, No.6.– P. 525–537.