

УДК 629.5.015.26

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛНОМАСШТАБНОГО МАКЕТА ВЕТРОРОТОРА ДАРЬЕ С ПРЯМЫМИ УПРАВЛЯЕМЫМИ ЛОПАСТЯМИ

В. П. КАЯН \*, А. Г. ЛЕБЕДЬ\*\*

\* Институт гидромеханики НАН Украины

\*\* Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины

Получено 01.10.2009

Представлены результаты исследований в аэродинамической трубе по определению влияния управления углом установки лопасти относительно траверсы во время вращения ветрогенератора типа Дарье с прямыми лопастями на его мощностные и моментные характеристики. Показана способность ветрогенератора с управляемыми лопастями самозапускаться при очень малых скоростях набегающего на ветрогенератор потока и возможность значительного увеличения коэффициентов использования энергии потока и крутящего момента на валу за счет оптимизации закона управления лопастями.

Наведені результати досліджень в аеродинамічній трубі по визначенню впливу керування кутом встановлення лопаті щодо траверси під час обертання вітрогенератора типу Дар'є з прямими лопатями на потужнісні та моментні характеристики вітрогенератора. Показано здатність вітрогенератора з керованими лопатями самозапускатися при дуже низьких швидкостях потоку, що набігає на вітрогенератор, та можливість значного збільшення коефіцієнтів використання енергії потоку і крутного моменту на валу за рахунок оптимізації закону керування лопатями.

Results of researches of influence of control of angle of blade installation concerning a cross-piece during vertical axis wind turbines (VAWT) rotation on power and torque characteristics of VAWT in wind tunnel are shown. Ability of VAWT with controlled blades to selfstart at very low speeds of flow and the capability of substantial growth of operating ratios of flow energy and a torque on VAWT shaft are shown.

### ВВЕДЕНИЕ

Производство энергии из возобновляемых (или альтернативных) источников на земном шаре растет стремительными темпами. Одним из таких неисчерпаемых источников энергии на Земле является ветер.

Однако наиболее распространенные на сегодня ВЭУ с горизонтальной осью вращения ветродвигателя пока не могут превысить по мощности 5 – 7 МВт, что, в свою очередь, ограничивает возможности снижения стоимости кВт-часа до конкурентоспособной величины. К примеру, самая мощная на сегодня введенная в эксплуатацию ветроустановка такого типа мощностью в 5 МВт создана в Германии. Длина лопасти ее ветрогенератора составляет 61 м, высота башни 120 м [1].

В то же время, мощность ВЭУ с вертикальной осью вращения (ВОВ) ветрогенератора (типа ротора Дарье, но с прямыми лопастями) может достигать, по оценкам экспертов, 10–30 МВт. Можно перечислить такие преимущества этих ветроустановок как независимость функционирования от направления действия 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 материалоемкости (а значит и стоимости), уменьшение шумности ВЭУ и площади земельного участка для ее размещения и т. д. [2]. Кроме того, разработки последнего десятилетия показали, что ветрогенераторы с ВОВ небольшой мощности могут вполне успешно функционировать на крышах отдельных зданий.

Все более возрастающий интерес ученых и конструкторов всего мира к ветроэнергетическим установкам такого типа можно проиллюстрировать тем, что на состоявшейся в Канаде в июне 2008 года 8-ой Всемирной конференции по ветроэнергетике на секции "Конструкция ветроустановок" все доклады (из США, Канады и др.) были посвящены ветроустановкам с ВОВ с прямыми лопастями (сайт [www.wvec2008.com](http://www.wvec2008.com)).

Одним из главных недостатков ветрогенераторов с ВОВ с жестко фиксированными относительно траверс лопастями являются высокая скорость ветрового потока, при которой происходит самозапуск ротора во вращение и более низкий коэффициент использования энергии потока. В результате проектировщики вынуждены снабжать такие ветроустановки дополнительными устройствами (электродвигатель, ротор Савониуса и др.) для раскрутки ротора и выведения его на рабочий режим.

Высокая скорость самозапуска такого ветроротора вызвана тем, что фиксированные жестко относительно горизонтальных траверс вертикальные лопасти ротора в статическом состоянии не могут создать (при обтекании их ветровым потоком средней и малой скорости) необходимой величины и нужного направления действия аэродинамических сил на лопастях и, тем самым, достаточного крутящего момента на валу для приведения ротора во вращение. Применение в конструкции ветроротора механизма управления положением лопастей позволяет повернуть лопасти относительно траверс так, что величина и направление действия результирующей аэродинамической силы на лопастях позволяют осуществить самозапуск ветроротора даже при скоростях потока 3 – 4 м/сек. Кроме того, управление положением лопастей дает возможность значительно улучшить рабочие характеристики такого ветроротора [3], снизить в несколько раз величину аэродинамического сопротивления ветроротора [4].

## 1. ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ

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  $\alpha$  [5]. 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  $\alpha$ . Если поставить на траверсе какие-то упругие ограничители поворота лопасти, то появляется возможность пассивно регулировать углы атаки лопасти в зависимости от скорости вращения ветроротора.

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 [6, 7] представлены результаты испытаний в аэродинамической трубе ветророторов с ВОВ с некоторыми угловыми колебаниями лопастей относительно некоторого центрального положения на траверсе с помощью кулачковых механизмов. В [6], напри-

мер, задавая разную амплитуду колебаний, авторы показали, что при низких значениях коэффициента быстроходности  $\lambda_p$  более эффективны колебания лопасти с большой угловой амплитудой, а при более высоких значениях  $\lambda_p$  эффективны колебания с малой амплитудой. В работе [7] применялся ряд кулачков различной формы, что позволило исследовать работу модели ветроротора с различной формой и амплитудой угловых колебаний лопасти. Однако авторы не дали никаких предложений по способу реализации своих результатов.

Несмотря на большое количество запатентованных за последние десятилетия механизмов управления лопастями ветророторов с ВОВ, в литературе практически отсутствует информация об экспериментальных исследованиях таких ветророторов (или их моделей), ни один из авторов патентов не говорит о законах управления предлагаемых ими устройств. В Институте гидромеханики НАНУ был разработан конструктивно достаточно простой механизм управления лопастями такого ветроротора и проведен цикл исследований моделей ветророторов в гидротомке [4, 8–10], которые показали высокую эффективность применения такого механизма управления лопастями ветроротора.

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Модель ветроротора [8–10] состояла из двух параллельных друг другу дисковых траверс, соединяющего их вертикального вала и прямоугольных лопастей, продольные оси которых были параллельны оси вала. Модели ветророторов отличались длиной лопастей и их количеством. Механизм изменения угла установки лопасти на траверсах относительно касательной к траектории кругового движения центра профиля лопасти в течение одного оборота ветроротора состоял из дополнительного диска с круговой канавкой, который размещался под нижней дисковой траверсой. Этот диск мог перемещаться относительно центра вращения модели вдоль линии действия набегающего потока так, что появлялся некоторый эксцентриситет  $e$  между осью вала модели ветроротора и центром окружностей, соответствующих стенкам канавки на диске. Лопасти на нижнем торце имели две оси, причем передняя ось устанавливалась шарнирно на нижней траверсе, а задняя ось проходила свободно сквозь щель в нижней траверсе и имела на конце шарикоподшипник, который размещался в канавке дополнительного диска.

Таким образом, данный механизм при каждом



Рис. 1. Макет ветроротора в аэродинамической трубе

определенном значении эксцентриситета  $e$  обеспечивал строго определенный закон изменения угла установки каждой лопасти относительно траверсы с угловыми колебаниями лопастей относительно передней оси с частотой, равной частоте вращения модели ветроротора.

Для подтверждения полученных на малых моделях ветроротора результатов [10] и проведения более масштабных исследований ветроротора с управляемыми лопастями в потоке воздуха в ИГМ НАНУ совместно с ООО "Продмаш" (г. Мелитополь, Запорожская обл.) в 2006–2007 годах был разработан, создан и в 2007 году испытан в аэродинамической трубе Киевского Национального авиационного университета макет трехлопастного ветроротора с запатентованным ИГМ НАНУ [11–12] механизмом управления лопастями с ожидаемой мощностью на валу ветроротора величиной около 1 кВт.

Ветроротор (рис. 1) имел следующие размеры – профиль лопасти NASA 0015 [13], длина лопасти  $l = 1.95$  м; длина хорды лопасти  $b = 0.41$  м; удлинение лопасти  $\lambda = 4.75$ . На нижнем торце лопасти силовая нервюра имела две выступающие в сторону оси вращения ветроротора проушины с отверстиями. Центр отверстия на передней про-

ушине находился на расстоянии 75 мм от хорды профиля лопасти и отверстие служило для размещения оси поворота лопасти относительно траверсы. Расстояние между осями в проушинах на нижнем торце лопасти составляло  $b_1 = 0.145$  м, или 0.1 от диаметра окружности  $D = 1.45$  м, управляющей поворотом лопасти относительно траверсы. Центр отверстия на второй проушине был смещен в сторону хорды профиля лопасти таким образом, что угол установки хорды профиля лопасти относительно касательной к траектории вращения в точке, отстоящей на 0.13 м от носка профиля, был равен  $4^\circ$  (при нулевом смещении управляющей окружности) [14, 15]. Радиус кругового вращения лопасти  $R = 0.8$  м, площадь рабочего сечения  $S = 3.12$  м<sup>2</sup>, коэффициент заполнения ветроротора  $\sigma = 3b/2R = 0.77$ , максимальная достигаемая величина относительного эксцентриситета  $\epsilon = e/R = 0.12$  (12%). Диапазон скоростей, при которых проводились исследования работы ветроротора, составлял 5–13 м/с. Размеры поперечного сечения рабочего участка аэродинамической трубы были  $B \times H = 4 \times 2.5$  м.

Для создания нагрузочного момента на валу ветроротора использовались электромагнитные тормозные муфты типа INTORQ производства Италии с заданным фиксированным тормозным моментом на валу. Муфты располагались на верхнем конце вспомогательного опорного вала за пределами рабочей части аэродинамической трубы. Там же находился двухкомпонентный тензодинамометр для измерения взаимно перпендикулярных горизонтальных сил на верхней опоре вспомогательного вала ветроротора. Скорость вращения ветроротора определялась с помощью индуктивного бесконтактного датчика ВБИ-МО8-48У-2111-М и тахометра. Линейные перемещения направляющей окружности вдоль направления действия воздушного потока осуществлялись с помощью электродвигателя с червячным редуктором и контролировались датчиком контроля перемещений типа "Honeywell" RPN 1A 112.

При проведении измерений задавались величины скорости  $V$  воздушного потока в рабочей части аэродинамической трубы и величина эксцентриситета  $e$  центра направляющей окружности относительно оси вращения ветроротора, при которой величину тормозного момента  $M$  на валу ветроротора увеличивали от нуля (все тормозные муфты отключены) с шагом 7.5 Н·м до величины  $M_{max}$ , при которой ветроротор еще мог работать с минимальной скоростью вращения. Следует отметить, что самозапуск ветроротора во вращение произошел при минимальной для данной аэродинамиче-

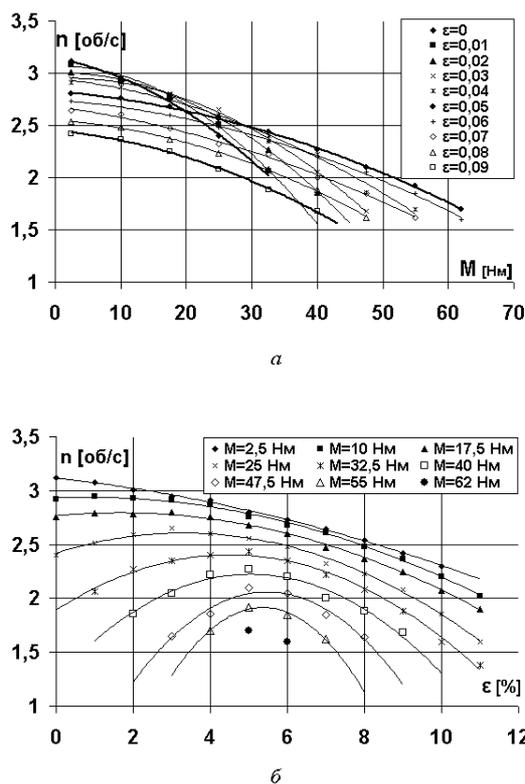


Рис. 2. Зависимости величины скорости вращения ветроротора  $n$  от величины нагрузочного момента на валу  $M$  (а) и величины относительного эксцентриситета  $\epsilon$  (б) при скорости потока  $V = 12$  м/с

ской трубы скорости ветрового потока  $V = 4.8$  м/с (при этом  $\epsilon$  было равно 0.08).

Картина изменения скорости вращения ветроротора (количество оборотов в секунду)  $n$  при постоянной скорости набегающего потока  $V$  и различных величинах нагрузочного момента  $M$  и относительного эксцентриситета  $\epsilon$  представлена на рис. 2. При малых величинах эксцентриситета  $\epsilon$  или его отсутствии ( $\epsilon = 0 \div 0.02$ ) небольшое увеличение нагрузочного момента на валу ветроротора приводит к быстрому снижению скорости вращения ветроротора и к его остановке (рис. 2, а), при оптимальной величине  $\epsilon = 0.05$  наблюдается максимальная скорость вращения при максимальном нагрузочном моменте, т. е. производимая ветроротором мощность максимальна. На рис. 2, б показана зависимость величины  $n$  от величины эксцентриситета  $\epsilon$  управляющей окружности при различных фиксированных значениях нагрузочного момента на валу ветроротора  $M$ .

При некоторой величине относительного эксцентриситета  $\epsilon_{opt}$  (для конкретной скорости ветрового потока и фиксированной величины нагрузочно-

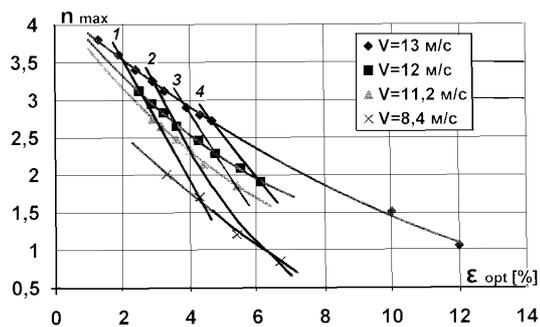


Рис. 3. Зависимости максимальных величин скорости вращения ветроротора  $n_{max}$  от величин относительного эксцентриситета  $\epsilon = e/R$  и нагрузочного момента  $M$  при различных скоростях потока  $V$  (линии 1 – 4 обозначают  $M = 10; 25; 40;$  и  $55$  Нм соответственно)

го момента) достигается максимально возможная мощность на валу ветроротора, которая определяется как

$$P_{max} = 2\pi M n_{max}, \quad (1)$$

где  $n_{max}$  соответствует максимальной скорости вращения при определенной величине момента  $M$ .

На рис. 2, б максимальная мощность достигается при максимальном рабочем моменте на валу  $M = 62$  Н·м и скорости вращения ветроротора  $n = 1.7$  об/с. Величина относительного эксцентриситета  $\epsilon_{opt}$  управляющей окружности равна при этом 0.05. Характер представленных кривых  $n(\epsilon)$  убедительно показывает, что для любой возможной для данного ветроротора величины нагрузочного момента на валу  $M$  существует определенная величина относительного эксцентриситета  $\epsilon$ , при которой скорость вращения ветроротора максимальна, а значит и максимальна при данном нагрузочном моменте производимая ветроротором мощность.

Если точки, соответствующие максимумам кривых на рис. 2, б, соединить, то оказывается, что они очень хорошо укладываются на одну линию, весьма близкую по форме к прямой. На рис. 3 показаны такие линии (т. е. зависимости  $n_{max}$  от величин оптимального относительного эксцентриситета  $\epsilon_{opt} = e_{opt}R$  и нагрузочного момента на валу ветроротора  $M$ ) при нескольких величинах скорости  $V$  набегающего потока. Оказалось, что если соединить точки с одной и той же величиной нагрузочного момента на валу при разных скоростях набегающего потока, то они также располагаются на линиях, довольно близких по форме к прямым (рис. 3). По сути эти линии показывают, какую при данной скорости ветра нужно установить величину

ну относительного эксцентриситета управляющей окружности, чтобы получить максимальную мощность на валу при необходимом значении либо скорости вращения ветроротора, либо крутящего момента на его валу.

### 3. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОРОТОРА

Рабочие характеристики ветроротора определялись следующим образом:

коэффициент использования энергии потока

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

где  $P = 2\pi nM$  – полезная мощность, развиваемая ротором;  $\rho$  – плотность воздуха;  $S = 2Rl$  – площадь рабочего сечения ветроротора;

коэффициент крутящего момента

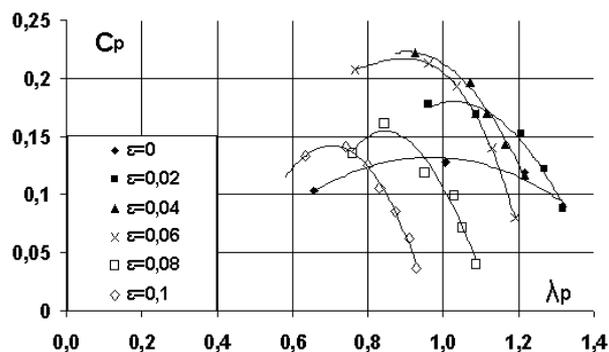
$$C_m = C_p/\lambda_p, \quad (3)$$

где  $\lambda_p = 2\pi nR/V$  – коэффициент быстроходности, который в физическом плане показывает соотношение скоростей – окружной скорости лопасти  $V_{\text{окр}} = 2\pi nR$  и скорости набегающего на ветроротор воздушного потока  $V$ .

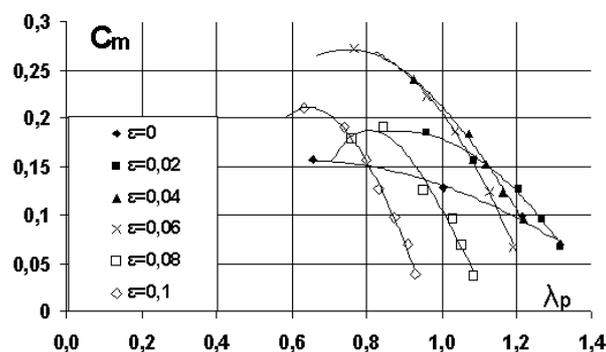
Зависимости величины коэффициента использования энергии потока  $C_p$  и коэффициента крутящего момента  $C_m$  от величины коэффициента быстроходности  $\lambda_p$  при различных фиксированных значениях относительного эксцентриситета  $\epsilon$  представлены на рис. 4.

Хорошо видно, что в данном случае максимальная величина  $C_p$  достигается при  $\epsilon = 0.04$  и  $\lambda_p = 0.9$ , а максимальная величина  $C_m$  – при  $\epsilon = 0.06$  и  $\lambda_p = 0.8$  (т.е. для ветроротора с управляемыми лопастями получено увеличение на 70% коэффициентов  $C_{p_{\text{max}}}$  и  $C_{m_{\text{max}}}$  относительно тех же характеристик для ветроротора с неуправляемыми лопастями). Необходимо отметить, что при проектировании макета ветроротора на заводе были допущены некоторые конструкторские просчеты, в результате чего конструкция макета ветроротора получилась очень тяжелой с достаточно большим моментом сопротивления вращению. Этот тормозящий момент привел, в свою очередь, к снижению величины коэффициента быстроходности ветроротора и абсолютных значений коэффициентов  $C_{p_{\text{max}}}$  и  $C_{m_{\text{max}}}$ .

Более иллюстративно влияние величины относительного эксцентриситета  $\epsilon$  управляющей окружности на рабочие характеристики ветроротора при определенной скорости набегающего потока  $V$



а

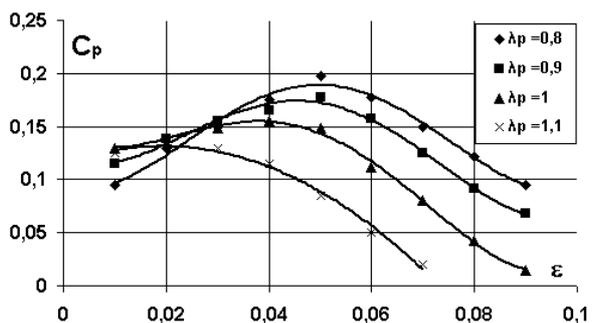


б

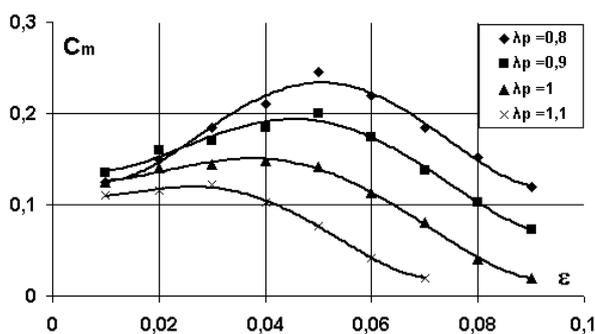
Рис. 4. Зависимости величин коэффициентов использования энергии потока  $C_p$  (а) и крутящего момента  $C_m$  (б) от коэффициента быстроходности  $\lambda_p$  при различных значениях относительного эксцентриситета  $\epsilon$  (скорость потока  $V = 13$  м/с)

показано на рис. 5. Хорошо видно, что все графики зависимостей  $C_p(\epsilon)$  и  $C_m(\epsilon)$  имеют явно выраженные максимумы для всех представленных на графиках величин коэффициента быстроходности  $\lambda_p$  с абсолютным максимумом при одном и том же значении  $\epsilon = 0.05$  для случая наименьшего значения  $\lambda_p = 0.8$ . С возрастанием величины коэффициента быстроходности ветроротора (в данном случае при  $V = \text{const}$  это эквивалентно возрастанию скорости вращения ветроротора, связанного с уменьшением нагрузочного момента на валу ветроротора) этот максимум достигается при все меньшей величине относительного эксцентриситета  $\epsilon$  управляющей окружности.

Зависимости величин максимальной мощности  $P_{\text{max}}$ , вычисленных из (1), на валу ветроротора от величины относительного эксцентриситета  $\epsilon$  при различных скоростях набегающего потока  $V$  представлены на рис. 6.



а



б

Рис. 5. Зависимости величин коэффициентов использования энергии потока  $C_p$  (а) и крутящего момента  $C_m$  (б) ветрогенератора от величины относительного эксцентриситета  $\epsilon$  при различных значениях коэффициента быстроходности  $\lambda_p$  (скорость потока  $V = 12$  м/с)

Штриховыми линиями 1–8 на графике соединены точки с одинаковой величиной нагрузочного момента  $M = 2.5; 10; 17.5; 25; 32.5; 40; 47.5; 55$  Н·м. Максимумы на кривых зависимостей  $P_{max}(\epsilon_{opt})$ , соответствующих указанному на рисунке скоростям набегающего потока, лежат практически на одной линии  $P_{opt}$ , которая показывает, какой надо установить величину эксцентриситета  $\epsilon$ , чтобы при любой скорости ветрового потока получить на этом ветрогенераторе максимум выходной мощности.

Полученные нами характеристики трехлопастного ветрогенератора с механизмом управления лопастями можно сравнить с характеристиками близкого ему по геометрическим размерам двухлопастного ветрогенератора с жестко закрепленными на траверсах лопастями со следующими геометрическими размерами:  $l = 2.55$  м;  $b = 0.4$  м; площадь рабочего сечения ротора  $S = 7.65$  м<sup>2</sup>. Испытания

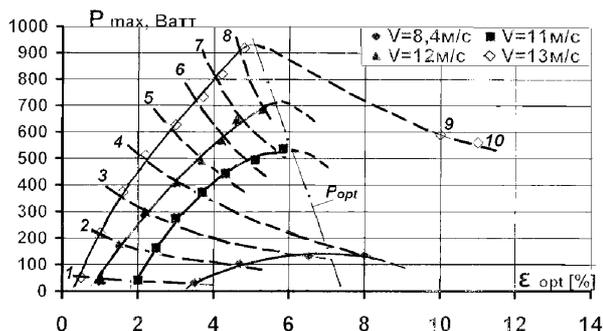


Рис. 6. Зависимости величины вырабатываемой на валу ветрогенератора мощности  $P_{max}$  от величины относительного эксцентриситета  $\epsilon_{opt}$  и величины момента  $M$  при  $V = \text{various}$

этого ветрогенератора проводились в конце 80-х годов как в аэродинамической трубе ЦАГИ, так и на полигоне в натуральных условиях [16]. При скорости потока  $V = 11$  м/с на таком ветрогенераторе удалось получить 65 Вт с 1 м<sup>2</sup> площади рабочего сечения ветрогенератора в аэродинамической трубе и 85 Вт – в натуральных условиях. Соответствующий показатель для нашего ветрогенератора в аэродинамической трубе составил 170 Вт, т. е. в 2.5 раза больше, а при скорости потока в трубе  $V = 13$  м/с мы получили 300 Вт с 1 м<sup>2</sup>.

#### 4. ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Для анализа закономерностей изменения полученных в эксперименте результатов был проведен расчет кинематики движения отдельной лопасти на разных режимах ее кругового движения 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  $\alpha$  [5], 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 управляющей окружности) и вектором относительной скорости  $V_{отн}$  в точке, отстоящей на расстоянии  $0.32b$  от носика профиля. Вектор относительной скорости определялся как векторная разность скорости  $V$  невозмущенного потока, набегающего на ротор, и линейной скорости  $V_{окр}$  движения про-

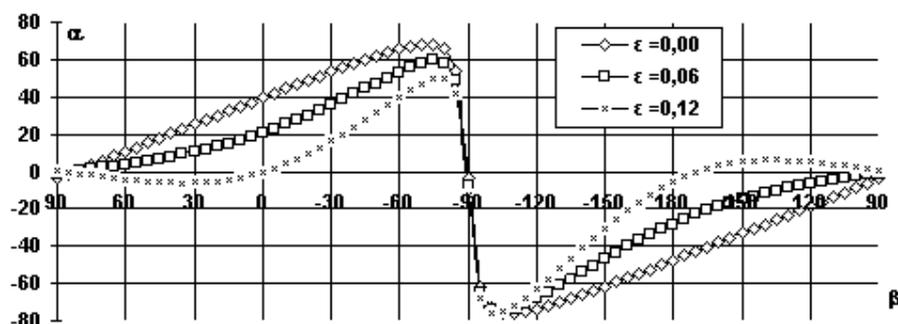


Рис. 7. Зависимости величины угла атаки  $\alpha$  для единичной лопасти макета ветроротора от азимутального угла поворота  $\beta$  лопасти относительно его центральной оси вращения

филя по окружности. При заведомой условности такого квазистационарного подхода он позволяет провести качественный анализ величин возникающих на лопасти аэродинамических сил.

На рис. 7 показано изменение мгновенных величин углов атаки  $\alpha$  лопасти в зависимости от азимутального угла поворота ветроротора  $\beta$  относительно центральной оси вращения макета ветроротора при величине коэффициента быстроходности  $\lambda_p = 1$  и величинах относительного эксцентриситета  $\epsilon = 0; 0.06; 0.12$ . Начальная точка оси абсцисс  $\beta = 90^\circ$  соответствует крайнему боковому положению лопасти, когда она идет навстречу набегающему потоку, точка  $\beta = 0^\circ$  соответствует крайнему положению лопасти на наветренной части траектории, точка  $\beta = -90^\circ$  соответствует крайнему боковому положению лопасти, когда она идет вдогонку за набегающим потоком, и точка  $\beta = 180^\circ (-180^\circ)$  соответствует крайнему положению лопасти на подветренной части траектории.

Анализ графиков на рис. 7 показывает, что при  $\epsilon = 0$  (вариант ветроротора с жестко фиксированными относительно траверс лопастями с углом установки лопасти  $4^\circ$  [14, 15] относительно касательной к круговой траектории в точке крепления лопасти к траверсе – в нашем случае в точке крепления передней оси лопасти) значительную часть наветренного участка круговой траектории (до  $130^\circ$ ) профиль лопасти проходит при закритических углах атаки (т. е. при отрывном обтекании). На этих участках возникающая на лопасти подъемная сила, дающая положительный вклад в общий момент вращения ротора, резко падает, а лобовое сопротивление, дающее (как правило) отрицательный вклад, резко возрастает (рис. 8), что приводит к значительному снижению величины аэродинамического качества профиля  $K = C_y/C_x$ .

Смещение управляющей окружности до некото-

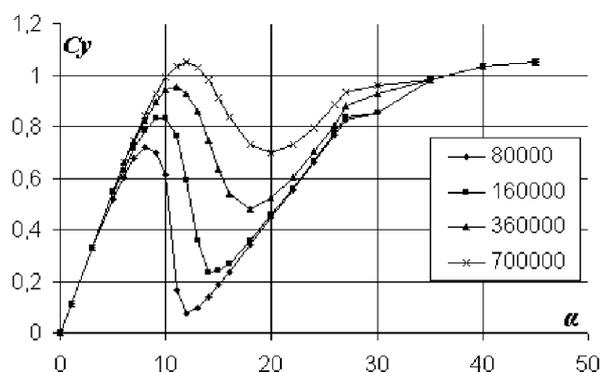


Рис. 8. Зависимости  $C_y(\alpha)$  для профиля NACA0015 при числах  $Re = (0.8 - 7.0) \times 10^5$  [13]

рой оптимальной величины (например до  $\epsilon = 0.06$ ) приводит к возникновению переменного угла установки профиля лопасти по отношению к траверсе на круговой траектории движения лопасти, что, в свою очередь, приводит к уменьшению протяженности участков траектории с закритическими углами атаки лопасти (до  $80^\circ$ ) и увеличению протяженности участков траектории с докритическими углами атаки. Это, в свою очередь, приводит к существенному возрастанию величины крутящего момента на валу ветроротора (рис. 9, а).

Дальнейшее увеличение эксцентриситета  $\epsilon$  приводит к снижению эффективности работы ветроротора, так как при этом появляются участки траектории, где углы атаки близки к нулю и даже появляются отдельные участки, где углы атаки меняют знак на противоположный (кривая  $\epsilon = 0.12$  на рис. 7), т. е. подъемная сила меняет направление действия на  $180^\circ$  и ее тангенциальная составляющая начинает тормозить ветроротор.

Для более наглядного рассмотрения картины влияния кинематических параметров лопа-

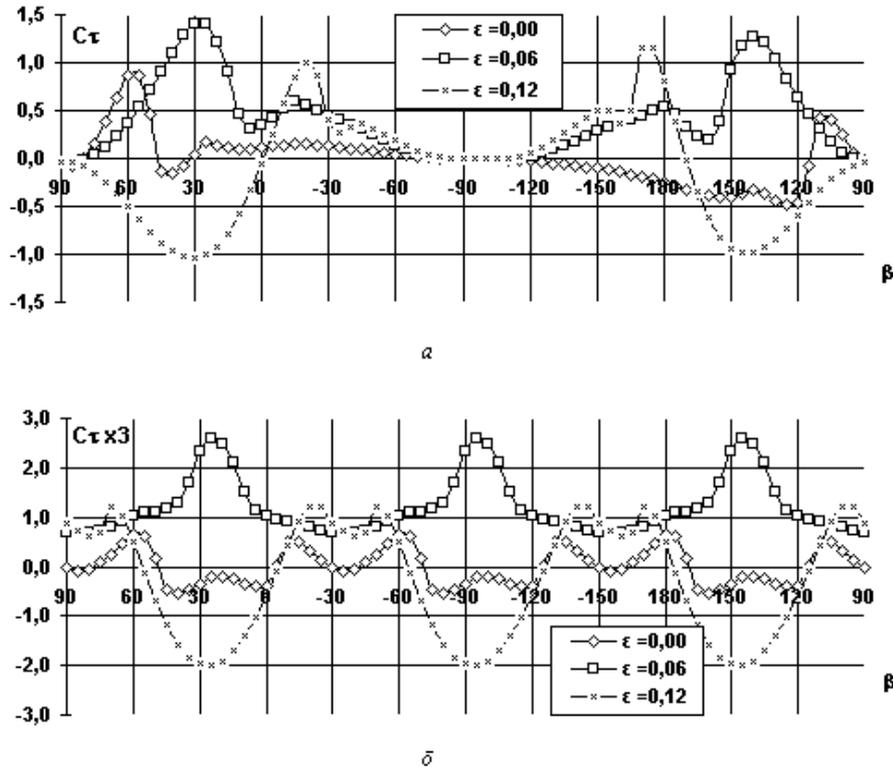


Рис. 9. Зависимости величины коэффициента  $C_\tau$  для единичной лопасти макета ветроротора (а) и для трехлопастного макета ветроротора (б) от азимутального угла поворота  $\beta$  лопасти относительно его центральной оси вращения

сти ветроротора на его рабочие характеристики, с использованием квазистационарного подхода были рассчитаны подъемная сила и лобовое сопротивление лопасти в различных точках траектории ее кругового движения, а также сумма проекций этих сил на касательную к окружности, т. е. ее тангенциальная составляющая  $C_\tau$ .

Известно, что величина числа Рейнольдса  $Re = Vb/\nu$ , при котором работает крыло, существенно влияет на характер зависимости  $C_y(\alpha)$ , особенно в области закритических углов атаки.

На рис. 8 показаны зависимости коэффициента подъемной силы профиля  $C_y$  от угла атаки  $\alpha$  (в диапазоне  $0^\circ - 45^\circ$ ) крыла с профилем NACA 0015 при различных числах  $Re$ , полученные в аэродинамической трубе с малой турбулентностью лаборатории Sandia [13]. Максимальное число  $Re$  для лопасти макета ветроротора в наших экспериментах составляло  $(3 - 4.5) \times 10^5$ , поэтому для расчета были взяты данные с кривой  $C_y(\alpha)$  на рис. 8 при  $Re = 360000$ .

На рис. 9, а представлена расчетная зависимость коэффициента тангенциальной силы  $C_\tau$  от азимутального угла поворота  $\beta$  при  $\lambda_p = 1$  для от-

дельной лопасти. Именно эта касательная составляющая результирующей силы и создает крутящий момент на валу ветроротора. 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 управляющей окружности вниз по потоку значительно увеличивается величина создаваемого лопастью крутящего момента и на наветренной части траектории и на ее подветренной части (кривая  $\epsilon = 0.06$  на рис. 9, а), при этом участки, где лопасть создает тормозящий момент, практически исчезают.

При дальнейшем увеличении эксцентриситета работа ветроротора становится менее эффективной. Значительно уменьшается создаваемый лопастью полезный крутящий момент на наветренной части траектории, и появляется существенный тормозящий момент на подветренной части траектории. Отметим, что качественная картинка результатов расчета достаточно хорошо совпадает с результатами проведенного эксперимента (см.

рис. 5).

На рис. 9, б представлены результаты расчета по этой же методике суммарной тангенциальной силы для трехлопастного ветроротора. За счет сложения тангенциальных сил от трех лопастей с разностью фаз в  $120^\circ$  при  $\epsilon = 0$  формируются четко видимые положительные и отрицательные двойные пики суммарного крутящего момента. Со смещением управляющей окружности в сторону оптимального положения появляются три ярко выраженных одинарных пика. Понятно, что это приводит к значительному росту общего крутящего момента на валу ротора. Однако при дальнейшем увеличении эксцентриситета положительные пики исчезают и на их месте появляются как бы зеркально отраженные пики тормозящего момента, при этом интегрированная за один оборот величина общего крутящего момента падает до нуля и даже до отрицательного значения (в эксперименте происходила остановка макета ветроротора).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью поставленного эксперимента был сравнительный анализ характеристик обычного ветроротора типа Дарье с жестким креплением прямых лопастей на траверсах и подобного ему геометрически ветроротора с активным управлением лопастями на траектории их кругового движения. Преимущества последнего наглядно отображены на рис. 5. Однако полученные при испытаниях ветроротора невысокие абсолютные значения коэффициентов  $C_p$  и  $C_m$  требуют некоторого объяснения.

Во-первых, полученное нами значение коэффициента  $C_p$  относится к так называемой полезной энергии  $P_{net}$  ветроротора, которая поступает уже непосредственно потребителю. В общем же случае под  $C_p$  подразумевается вся энергия, произведенная ветроротором и использованная на преодоление момента сопротивления опор вала, аэродинамического сопротивления ветроротора и энергии, направляемой потребителю (электрогенератор, насос или др.). Наши исследования на моделях показали, что у модели с жестко фиксированными лопастями эти потери составляют около 30%, а у такой же модели с механизмом управления – 20% от всей произведенной ветроротором мощности [18]. К сожалению, измерить эти потери при проведении данного эксперимента оказалось технически невозможным.

Во-вторых, в связи с рядом конструкторских и технологических особенностей завода-изготовителя практически все детали (кроме ло-

пастей) были изготовлены из стали со значительным превышением толщин их элементов над необходимыми. Это привело к очень высокому весу как установки в целом, так и отдельных ее частей. Очень тяжелыми (по 20 кг) оказались и лопасти, содержащие внутри силовой набор (лонжеронного типа) и покрытые сверху стеклотканью и эпоксидной смолой. Все это привело к очень большим нагрузкам на опору вращения с радиально-упорным подшипником, и как следствие к моменту сопротивления вращению на опоре в 2.5–3 Н·м при скорости вращения ветроротора 0.2–0.3 об/с. Исследования на моделях [18] показали, что при повышении скорости вращения ветроротора потери мощности этого рода также значительно возрастают.

В-третьих, шесть траверс, к которым шарнирно крепились лопасти, были выполнены из стальных труб квадратного сечения размером  $30 \times 30$  мм, что привело к существенному аэродинамическому сопротивлению полного комплекта траверс, особенно при высоких скоростях набегающего потока (10–13 м/с) и скорости вращения ветроротора (2–3 об/с), что, в свою очередь, также уменьшило полезный вращающий момент на валу ветроротора. Поэтому в дальнейшем необходимо либо для траверс применять рычаги со специальным хорошо обтекаемым профилем поперечного сечения [17], либо крепить на рычагах обтекатели [5].

Кроме того, заводу-изготовителю не удалось точно выдержать форму профиля лопасти, в то время как в [5] отмечается, что отклонение ординаты профиля от теоретического не должно превышать 0.02% от длины хорды. Все вышеперечисленные особенности конструкции и технологии изготовления оказали существенное влияние на затормаживание ветроротора и увеличили неучтенные потери энергии.

Результаты испытаний показали, что применение у ветророторов с вертикальной осью вращения очень простого в конструктивном и технологическом плане механизма управления лопастями ветроротора позволяет значительно снизить скорость ветра, при которой ветроротор способен самозапуститься, снизить величину ветровой нагрузки на вал ветроротора, значительно улучшить его рабочие характеристики и снизить стоимость энергии, производимой ветроустановкой. По нашему мнению, ветроэнергетическая установка с таким ротором будет особенно выгодна при производстве других (неэлектрических) видов энергии. В то же время, можно надеяться, что такие ветроустановки будут также весьма эффективными как в качестве недорогих генераторов энергии мощно-

стью 2–10 кВт для індивідуальних домів или хозяйств, так и в качестве насосных установок мощностью 20–50 кВт для добычи и перекачки нефти или воды.

1. Seidel M., Gosswein J. Advances in Offshore Wind Turbine Technology // Wind Energy – Proceedings of the Euromech Colloquium.– Berlin –Springer.– 2006.– С. 287-291.
2. Денисенко О. Г., Козловский Г. А., Федосенко Л. П., Осадчий А. И. Преобразование и использование ветровой энергии.– Киев: Техника, 1992.– 176 р.
3. Avallone E. A., Baumeister T. Standard Handbook for Mechanical Engineers.– 9-th Ed: McGraw Hill, 1978.– 645 р.
4. Гринченко В. Т., Каян В. П., Кочин В. А. Исследование и оптимизация рабочих характеристик ветротуратора с вертикальной осью вращения с механизмом управления лопастями // Доповіді НАН України.– 2008.– №.12.– С. 62-68.
5. Kirke B. K. Evaluation of Self-Starting Vertical Axis Wind Turbines for Stand-Alone Applications.– PhD Thesis: Griffith University, Australia, 1998.– 338 р.
6. 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.– С. 101-118.
7. 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.– С. 775-783.
8. 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.– С. 229-240.
9. 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.
10. Довгий С. А., Каян В. П., Кочин В. А., Лебедь А. Г. Исследования влияния активного управления прямыми лопастями на рабочие характеристики ветротуратора Дарье // Прикладная гидромеханика.– 2010.– 12, №.2.– С. 1-2.
11. Каян В. П., Довгий С. О., Бойко П. М., Лебедь О. Г. Вітросилова установка // Патент України №16097А на корисну модель, МПК F03D 3/00 F03D 7/06.– 2006.– №.7.– С. 5.174.
12. Гребеніков В. В., Довгий С. О., Каян В. П., Кочин В. А. Вітросилова установка // Патент України №84319, МПК F03D 3/00, F03D 7/06.– 2008.– №.19.– С. 3.87.
13. 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 р.
14. 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–т.1. Вплив вітру на будинки і споруди.– 2001.– 29, No.4.– С. 149-153.
15. Fiedler A. J., Tullis S. Blade Offset and Pitch Effects on a High Solidity Vertical Axis Wind Turbine // Wind Engineering.– 2009.– 33, No.3.– С. 237-246.
16. Зубковский С. Л., Лятхер В. М., Федоров М. М., Цванг Л. Р. Взаимодействие ветрового потока с ветроэнергетической установкой // Физика атмосферы и океана (Известия АН СССР).– 1990.– 26, No.9.– С. 899-905.
17. 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.– С. 491-507.
18. Dovgy S. O., Kayan V. P., Lebid O. G. Performance optimization of a vertical axis wind turbine with mechanism of blade pitch control // Proc. 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on Applied Mechanics and Mech. Engin.– Cairo, Egypt.– 2010, May 24-28.– С. 76-84.