

УДК 629.5.015.26

В.П.Каян, канд.техн.наук (Ин-т гидромеханики НАН Украины, Киев), **А.Г.Лебедь**, канд.техн.наук (Ин-т телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Киев)

Ветророторы Дарье с прямыми управляемыми лопастями: опыт создания, испытания, оптимизация характеристик

Приведено краткое описание конструкций нескольких ветророторов с вертикальной осью вращения и прямыми управляемыми лопастями, а также результаты их исследований в аэродинамических трубах по определению влияния периодического изменения угла установки лопасти в течение одного оборота ветроротора с вертикальной осью вращения на их мощностные и моментные характеристики. Показана способность ротора с управляемыми лопастями самозапускаться при весьма низких скоростях ветрового потока, возможность значительного увеличения коэффициентов использования энергии потока и крутящего момента на валу ветроротора по сравнению с аналогичным ротором с жестко фиксированными лопастями.

Ключевые слова: ветророторы Дарье, управление лопастями, аэродинамическая труба.

Наведено стислий опис конструкцій кількох вітророторів з вертикальною віссю обертання та прямими керованими лопатями, а також результати їх досліджень в аеродинамічних трубах щодо визначення впливу періодичної зміни кута встановлення лопаті під час одного оберту вітроротора з вертикальною віссю обертання на їх потужнісні та моментні характеристики. Показана властивість ротора з керованими лопатями самозапускатися при вельми низьких швидкостях вітрового потоку, можливість значного підвищення коефіцієнтів використання енергії потоку і крутного моменту на валу вітроротора у порівнянні з аналогічним ротором із жорстко фіксованими лопатями.

Ключові слова: вітроротори Дар'є, керування лопатями, аеродинамічна труба.

Введение. Согласно прогнозу Программы развития ООН, новые и возобновляемые источники энергии в XXI столетии займут главенствующее или одно из ведущих мест в глобальном топливно-энергетическом балансе Земли. Одним из таких неисчерпаемых источников энергии на Земле является ветер. Проведенные во многих странах исследования показали, что современные ветроэнергетические установки (ВЭУ) могут быть эффективно использованы в регионах со среднегодовой скоростью ветра, превышающей 5-6 м/с.

Во всем мире растет движение к стопроцентному использованию энергии от возобновляемых источников в потребляемой энергии как отдельных компаний, так и целых стран. Так, в США в 2014 г. производство энергии от возобновляемых источников составило 540 ТВт·ч (13,2% от всего энергопотребления страны), в том числе 182 ТВт·ч от ветроэнергетики. Отметим также, что за счет совершенствования конструкций ВЭУ среднегодовой коэффициент использования энергии ветра в США вырос за 10 лет от 0,24 до 0,32 [1]. В Германии производство энергии от возобновляемых

источников в 2014 г. составило 25,8% от всего энергопотребления страны (24,1% в 2013 г.), в том числе от ветроэнергетики – 8,6% [2]. Дания вновь подтвердила свое обязательство перехода к 50% использования возобновляемых источников энергии для всего своего энергопотребления к 2020 г. Уже сегодня Дания покрывает за счет ветровой энергии 34% своей потребности в электроснабжении, а Испания и Португалия – более 20% [3]. В странах Европейского Союза уже в 2014 г. 8% всей потребляемой электроэнергии было произведено ветростанциями. В Украине, к сожалению, энергия от всех используемых альтернативных источников составляет лишь около 1% от всего энергопотребления.

Во многих странах одна за другой появляются большие ветростанции. Только в 2014 году в мире введены в действие ВЭУ общей установленной мощностью 51 ГВт, а общая мощность работающих ВЭУ достигла величины в 370 ГВт [4]. Рекордсменами по строительству новых ВЭУ в 2014 г. являются Китай (+23 ГВт), Германия (+5,3 ГВт) и США (+4,9 ГВт).

Наиболее распространены на сегодня ВЭУ с горизонтальной осью вращения ветродвигателя и установленной мощностью от сотен ватт до нескольких мегаватт. Такие ВЭУ требуют для установки вертикальных башен высотой от 10 до 150 м, механизмов для ориентирования площади вращения ветроротора перпендикулярно направлению ветра и значительных участков земной поверхности, в несколько раз превышающих величину ометаемой площади ветроротора. В то же время, ВЭУ с вертикальной осью вращения (ВОВ) ветроротора (типа ротора Дарье с прямыми лопастями) имеют такие достоинства, как независимость функционирования от направления действия ветрового потока, возможность перехода от консольного крепления оси ветроротора к двухопорному, возможность размещения потребителя энергии (электрогенератор, насос) в основании ветроустановки, упрощение конструкции лопастей и их крепления, возможность размещения ветророторов небольшой мощности (до 5 кВт) на крышах зданий [5]. Одним из главных недостатков ветророторов с ВОВ с жестко фиксированными относительно горизонтальных траверс лопастями является высокая скорость ветрового потока, при которой происходит самозапуск ротора во вращение, и большие вибрации на валу.

Исследование моделей ветроротора в воде.

Известно, что наличие у ветроротора Дарье механизма управления положением лопастей дает возможность повернуть лопасти относительно траверс таким образом, чтобы изменить величину и направление действия возникающей на них аэродинамической силы так, что появится возможность самозапуска ротора даже при малых (порядка 2-3 м/с) скоростях ветра. Кроме того, правильное управление положением лопастей позволяет значительно улучшить рабочие характеристики такого ветроротора, снизить в несколько раз нагрузку на вал ветроротора [6, 7].

Следует отметить, что еще в 80-90-е годы прошлого века в мире было зарегистрировано несколько десятков патентов на механизмы управления лопастями ротора Дарье, однако нигде и никогда не упоминалось о законах управления лопастью. Задачей нашего исследования было, во-первых, создать такой механизм управле-

ния лопастями, который минимально забирает бы часть энергии, производимой лопастями, и, во-вторых, определить оптимальное положение лопасти в каждой точке ее круговой траектории, которое бы обеспечило максимальную эффективность ветроротора. Эта задача решалась как конструктивными разработками, так и компьютерными расчетами, учитывающими многопараметричность нестационарного обтекания лопастей [6].

С начала 2000-х годов в Институте гидромеханики НАНУ исследования моделей ветророторов с управляемыми лопастями проводились сначала в гидрлотке на специальной экспериментальной установке [6, 7]. У ветророторов с жестко фиксированными относительно траверс лопастями угол установки хорды профиля лопасти к касательной к ее окружности вращения был выбран равным $+4^\circ$, профиль лопасти – осесимметричный типа NASA-0015 [8].

Механизм изменения угла установки лопасти относительно касательной к траектории ее вращения состоял из диска с круговой канавкой, в которой размещался конец задней оси лопасти с шарикоподшипником на конце. При использовании механизма управления №1, когда дорожка была круговой, диск имел возможность перемещаться относительно оси вращения модели ветроротора вдоль направления продольной оси гидрлотки, в результате чего появлялся некоторый эксцентриситет e между центром вращения ветроротора и центром вышеупомянутой круговой канавки. В механизме управления №2 дорожка была выполнена профилированной таким образом, что задавался определенный закон поворота лопастей так, чтобы на большей части как наветренной так и подветренной частей круговой траектории на лопасти выдерживался определенный угол атаки, величина которого зависела от формы профиля и числа Рейнольдса [7]. В дальнейшем на ветроротор был получен патент Украины [9].

Коэффициент быстроходности ветроротора λ_p , который показывает соотношение окружной скорости лопасти $V_{окр} = 2\pi nR$ и скорости набегающего на ветроротор потока V , определялся так:

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

где n – число оборотов ветроротора в секунду; $R = \text{const}$ – радиус окружности, по которой движется центр давления на хорде лопасти; V – скорость набегающего на модель ветроротора потока, измеренная в момент записи рабочего режима.

Коэффициенты использования энергии потока C_p и крутящего момента на валу ветроротора C_m определялись таким образом:

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

$$C_m = C_p / \lambda p, \quad (3)$$

где $P = 2\pi n M$ – полезная мощность, развиваемая моделью ветроротора; ρ – плотность воды; $S = 2Rl_{\text{лоп}}$ – ометаемая площадь модели ветроротора.

Результаты исследований модели ветроротора с механизмом №1 показали, что плавное увеличение относительного эксцентриситета $\varepsilon = e/R$ до некоторой оптимальной величины приводит к достаточно большому повышению величины коэффициента использования энергии потока C_p . Зависимость величины коэффициента крутящего момента C_m имеет такой же характер. Обнаружено, что чем меньше величина коэффициента быстроходности ветроротора λp (т.е. чем меньше скорость вращения ветроротора при заданной скорости набегающего потока), тем при большей величине $\varepsilon_{\text{опт}}$ достигаются максимумы коэффициентов C_p и C_m . Однако расчеты зависимости угла атаки на лопасти от угла поворота траверсы относительно набегающего потока показали, что наличествуют значительные участки на круговой траектории лопасти, где углы атаки являются закритическими [7], что приводит к снижению эффективности ветроротора.

В то же время использование механизма управления №2 со специальной профилированной дорожкой позволило поддерживать оптимальный угол атаки на лопасти на большей части ее круговой траектории. Это позволило существенно повысить производительность ротора (рис. 1).

Измерения величины гидродинамического сопротивления R_x модели ветроротора с механизмом №1 показали, что управление лопастями ветроротора может привести к снижению аэродинамической нагрузки на вал ветроротора в несколько раз. Кроме того, улучшаются условия

работы ветроротора, так как с увеличением относительного эксцентриситета ε постоянно снижается скорость вращения ветроротора и при этом в несколько раз уменьшается пульсационная составляющая гидродинамической нагрузки на вал [6, 7].

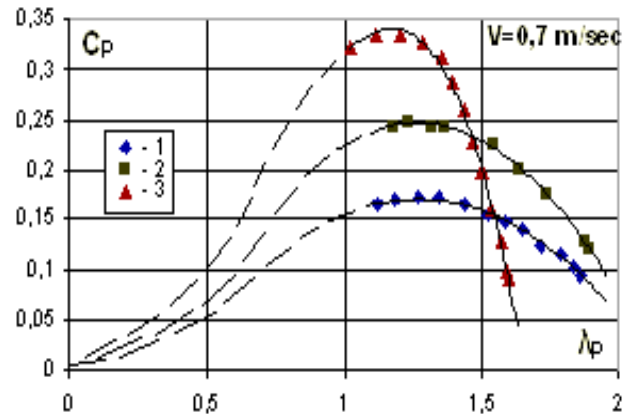


Рис. 1. Зависимости $C_p(\lambda p)$ для модели ротора Дарье трех конфигураций: 1 – ротор с жестко закрепленными лопастями; 2 – ротор с механизмом управления №1; 3 – ротор с механизмом управления №2.

Ветроротор с механизмом управления №1.

Для подтверждения результатов, полученных на малых моделях ветроротора, и проведения более масштабных исследований ветроротора в воздушном потоке 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 (ИГМ-1) с механизмом №1 управления лопастями, с ожидаемой выходной мощностью на валу ветроротора величиной около 1 кВт. Ветроротор (рис. 2) имел следующие параметры: длина лопасти $l_{\text{лоп}} = 1,95$ м; длина хорды лопасти $b = 0,41$ м; профиль лопасти NACA-0015; удлинение лопасти $\lambda = 4,77$; радиус кругового вращения лопасти $R = 0,8$ м; диаметр управляющей окружности $D = 1,45$ м; ометаемая площадь $S = 3,13$ м²; коэффициент заполнения $\sigma = 3b / 2R = 0,77$; максимальная достигаемая величина относительного эксцентриситета $\varepsilon = 0,12$. Исследования работы ветроротора проводились при скоростях воздушного потока от 5 до 13 м/с.



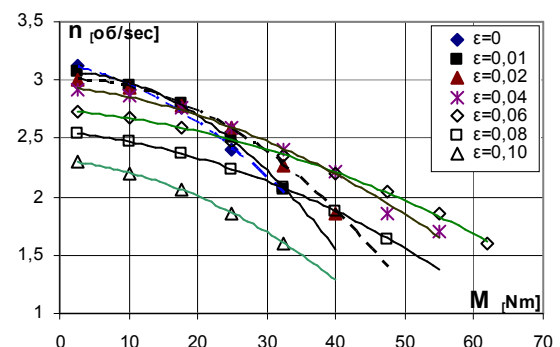
Рис. 2. Ветрогенератор ИГМ-1 (2007 г.) с механизмом управления №1 в аэродинамической трубе НАУ.

Для создания нагрузочного момента на валу ветрогенератора использовались тормозные муфты типа INTORQ с тормозными моментами на валу $M = 7,5; 15; 30$ и 60 Нм соответственно. Муфты располагались на верхнем конце дополнительного опорного вала выше потолка рабочей части аэродинамической трубы. Размеры поперечного сечения рабочего участка аэродинамической трубы были $B \times H = 4 \times 2,5$ м. Отметим, что ветрогенератор самозапустился при скорости потока $V = 4$ м/с, относительный эксцентриситет ϵ при этом был равен $0,08$.

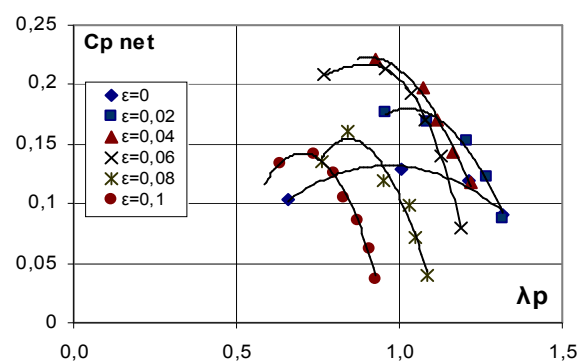
Зависимость скорости вращения ветрогенератора n [об/с] от величины полезного момента M [Нм] на валу при скорости ветрового потока $V = 12$ м/с и различных величинах относительного эксцентриситета ϵ представлена на рис. 3а. Когда эксцентриситет $\epsilon = 0$ или достаточно мал, увеличение нагрузочного момента на валу приводит к быстрому снижению величины скорости вращения ветрогенератора n . Когда же величина относительного эксцентриситета близка к оптимальной ($\epsilon = 0,04-0,06$), это снижение достаточно плавное и зависимость n от M практически линейная.

Зависимости коэффициента использования энергии потока $C_{p\ net}$, характеризующего только полезную (чистую) энергию на выходе вала ветрогенератора, представлены на рис. 3б, где хорошо видно, что эффективность ветрогенератора с управляемыми лопастями (когда $\epsilon = 0,05-0,06$) более чем в 1,5 раза выше, чем у ветрогенератора с жестко

установленными лопастями ($\epsilon = 0$). Невысокие значения коэффициента $C_{p\ net}$ обусловлены очень большими потерями энергии, производимой лопастями ветрогенератора, связанными с некоторыми конструктивными и технологическими особенностями ветрогенератора [10]. В частности, в связи с рядом конструкторских и технологических особенностей завода-изготовителя практически все детали (кроме лопастей) были изготовлены из стали со значительным превышением толщин их элементов над необходимыми. Это привело к очень большому весу как установки в целом, так и отдельных ее частей. Все это привело к очень большим нагрузкам на опору вращения с радиально-упорным подшипником, что привело к моменту сопротивления вращению на опоре в $2,5-3$ Нм при скорости вращения ветрогенератора $0,2-0,3$ об/с [10]. Исследования на моделях [7] показали, что при повышении скорости вращения ветрогенератора потери мощности у ротора также значительно возрастают.



а)



б)

Рис. 3. Зависимости величины числа оборотов ветрогенератора n в секунду от величины нагрузочного момента M на валу (а) и зависимости величин коэффициента $C_{p\ net}$ ветрогенератора ИГМ-1 от величины коэффициента быстроходности λp (б) при различных величинах относительного эксцентриситета ϵ при скорости ветра $V = 12$ м/с.

Во-вторых, 6 траверс, к которым шарнирно крепились лопасти, были выполнены из стальных труб квадратного сечения размером 30×30 мм, что привело к существенному аэродинамическому сопротивлению всего комплекта траверс, особенно при высоких скоростях набегающего потока (10-13 м/с) и скорости вращения ветроротора (3-4 об/с), что, в свою очередь, также уменьшило полезный вращающий момент на валу ветроротора. Поэтому в дальнейшем мы применяли для траверс либо рычаги с хорошо обтекаемым профилем поперечного сечения, либо крепили на рычагах обтекатели для размещения управляющих тяг [11, 12].

В-третьих, заводу-изготовителю не удалось точно выдержать форму профиля лопасти, в то время как известно, что отклонение ординаты профиля от теоретического не допускается более чем на 0,02% от длины хорды. Кроме того, очень тяжелыми (по 18 кг) оказались и лопасти, внутри которых размещался силовой набор из металла (лонжеронного типа), а поверхность была сформирована стеклотканью и большим количеством эпоксидной смолы. Это привело к очень большим инерционным нагрузкам на отслеживающие ролики механизма управления, которые были выполнены из бронзы и очень быстро истирались. Все вышеперечисленные особенности конструкции и технологии изготовления оказали существенное влияние на затормаживание ветроротора и увеличили неучтенные потери энергии.

Ветророторы с механизмом управления №2. Следующий трехлопастный ветроротор ИГМ-2 был спроектирован для испытаний в аэродинамической трубе Национального аэрокосмического университета "ХАИ". Его геометрические параметры были следующими: длина лопасти $l_{\text{лоп}} = 0,7$ м; лопастей было два комплекта с длиной хорды b 0,125 и 0,2 м; профиль лопасти НАСА-0015; удлинение лопастей $\lambda = 5,6$ и 3,5 соответственно; радиус кругового вращения лопасти $R = 0,5$ м; средний диаметр управляющей канавки $D = 0,2$ м; площадь рабочего сечения $S = 0,7$ м²; коэффициент заполнения $\sigma = 0,375$ и 0,6 соответственно (рис. 4). Основные параметры аэродинамической трубы Т-3, в которой проводили исследования, были следующие: диаметр

выходного сечения сопла $D_c = 1,5$ м; длина открытой рабочей части аэродинамической трубы $L = 2,05$ м; диапазон скоростей – 0,5-45 м/с.



Рис. 4. Ветроротор ИГМ-2 (2010 г.) с механизмом управления №2 в аэродинамической трубе НАКУ "ХАИ".

Измерение скорости потока в рабочей части аэродинамической трубы проводилось при помощи стандартного микроманометра ММН-250 №1912 с классом точности 0,5, полезный момент на валу ветроротора измерялся с помощью измерительного нагрузочного устройства ИНУ-5, которое представляло собой управляемую асинхронную магнитную муфту. Исследования проводились при скоростях потока на срезе сопла рабочей части аэродинамической трубы 7, 9 и 11 м/с [11].

Управляющий механизм №2 представлял собой металлический диск, расположенный под нижними траверсами ветроротора (рис. 4). В диске имелась специальным образом спрофилированная канавка, внутри которой двигались ролики (подшипники). Их оси были соединены с тягами, расположенными внутри нижних траверс, профиль поперечного сечения которых имел хорошо обтекаемую форму. Другим концом тяги были соединены с управляющими осями на торце лопастей. Диск крепился на нижней опоре жестко. Однако такая конструкция управляющего механизма оказалась нерациональной, поскольку эксперимент показал, что при движении ролика внутри профилированной канавки были весьма велики потери энергии, производимой лопастями ветроротора. Кроме того, нагрузки на незащищенный оболочкой подшипник оказались столь велики, что за время испытаний дважды произошло разрушение подшипника.

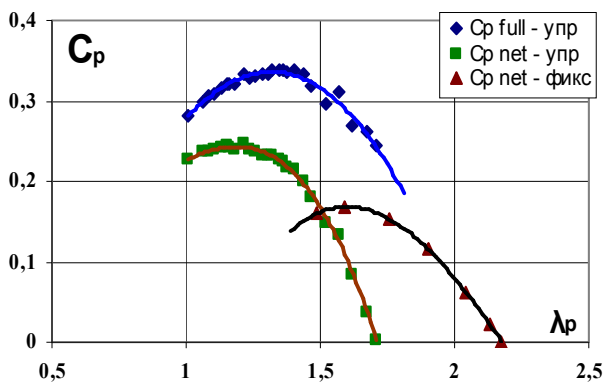


Рис. 5. Зависимости величин коэффициента C_p ветрогенератора от коэффициента быстроходности λ_r ($b = 0,2$ м, $V = 9$ м/с).

На рис. 5 кривая ($C_{p\ full}$ - упр) соответствует полной энергии, производимой управляемыми лопастями, а кривая ($C_{p\ net}$ - упр) – полезной энергии на валу ветрогенератора. Как видим, потери энергии в этом роторе составили около 30% от P_{full} . Кривая ($C_{p\ net}$ - фикс) соответствует тому же ветрогенератору, когда управляющий механизм отсутствует и лопасти установлены на траверсах жестко, а угол установки лопасти (т.е. угол между хордой лопасти и касательной к круговой траектории в месте крепления поворотной оси лопасти) составляет 10° [11].

Кроме того, как показали экспериментальные исследования, если при выборе величины оптимального угла атаки лопасти ротора на круговой траектории ее вращения руководствоваться зависимостями C_u - α , полученными при продувке в аэродинамической трубе неподвижного профиля (т.е. в статике), результаты работы ротора оказываются весьма неудовлетворительными. На практике лопасть работает как колеблющееся крыло, которое движется по круговой траектории. В таком случае характер нестационарного обтекания профиля существенно отличается от стационарного.

Еще в 80-х годах прошлого века была высказана гипотеза о том, что при периодически нестационарном обтекании профиля происходит затягивание отрыва на поверхности крыла, и оптимальный угол атаки, при котором обтекание профиля еще безотрывное, становится больше [13]. Наши эксперименты, а также компьютерное моделирование обтекания трехлопастного ротора как с фиксированными, так и с управляемыми

лопастями, подтвердили эту гипотезу.

Для определения оптимальных углов атаки на профиле лопасти ветрогенератора было проведено компьютерное моделирование обтекания ветрогенератора при различных режимах работы. Моделирование проводилось методом дискретных вихревых особенностей в нелинейной нестационарной постановке [14]. Используемый метод компьютерного моделирования позволяет проследить развитие во времени вихревого течения в следе за ветрогенератором и получить как мгновенные, так и интегральные динамические характеристики ветрогенератора. Задавая различные законы управления лопастями, можно при тех же геометрических параметрах ветрогенератора в достаточно широких пределах изменять величину производительности ветрогенератора, а, следовательно, и решать задачу оптимизации закона управления для заданной геометрии ветрогенератора и коэффициента быстроходности. При этом наличие численной визуализации течения позволяет лучше понять физику происходящих процессов и выявить закономерности, которые не могут быть выявлены одними лишь инструментальными измерениями.

На рис. 6 приведены результаты численной визуализации вихревого течения за ветрогенератором с фиксированными (вверху) и управляемыми (внизу) лопастями при коэффициенте быстроходности $\lambda_r = 1,2$. Из рисунка видно, что за ротором с фиксированными лопастями вихревой след имеет ярко выраженный турбулентный характер, отрицательно влияющий на динамические характеристики ротора. За ротором с управляемыми лопастями формируется хорошо видимая упорядоченная вихревая дорожка, и такой след приводит к улучшению динамических характеристик ротора. Отметим, что такое заметное различие вихревого следа имеет место именно при коэффициенте быстроходности $\lambda_r = 1,2$, для которого и оптимизировался закон управления лопастями. При изменении λ_r в большую или меньшую сторону вихревой след за ротором быстро теряет упорядоченный вид и теряется положительный эффект от управления лопастями, что в дальнейшем показали и результаты экспериментальных измерений.

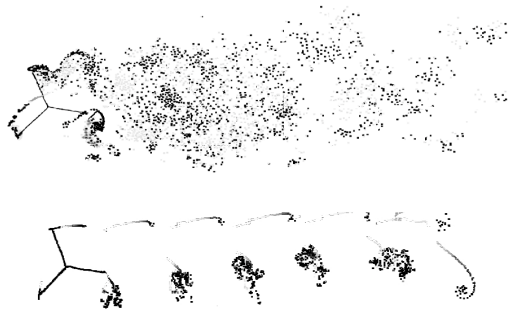


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования обтекания ветроротора с фиксированными лопастями (вверху) и управляемыми лопастями (внизу) при величине коэффициента быстроходности 1,2.

С учетом опыта проектирования и испытаний двух описанных выше ветророторов, а также результатов компьютерного моделирования, в ИГМ НАНУ в 2011-12 гг. был создан и прошел несколько испытаний в аэродинамической трубе НАУ ветроротор ИГМ-3 (рис. 7). Ветроротор имел следующие параметры: длина лопасти $l_{\text{лоп}} = 1,6$ м; длина хорды лопасти $b = 0,25$ м; профиль лопасти НАСА-0015; удлинение лопасти $\lambda = 6,4$; радиус кругового вращения лопасти $R = 0,7$ м; средний диаметр управляющей дорожки $D = 0,4$ м; площадь рабочего сечения $S = 2,24$ м²; коэффициент заполнения $\sigma = 0,54$. Лопасти были выполнены из углепластика, одна лопасть весила 2,7 кг.

Использовался механизм управления №2, который представлял собой цилиндрическую дорожку специальной формы в плане и толщиной 8 мм, расположенную под нижними траверсами ветроротора (рис. 7), по обеим сторонам которой двигалась пара роликов, соединенных специальной кареткой, которая шарнирно была соединена с тягой, расположенной внутри нижних траверс. Другим концом тяги были соединены с управляющими осями на торце лопастей. Управляющая дорожка крепилась на нижней опоре жестко. Конструкция ветроротора ИГМ-3 отличалась от предыдущих конструкций консольным креплением вала [12].

Нижний конец вала уходил под пол аэродинамической трубы, где на валу размещался диск с 60-ю отверстиями для измерения скорости враще-

ния ветроротора. Вал через редуктор с коническими шестернями соединялся с электромагнитной порошковой тормозной муфтой (мод. 14.512.08.1.2). Диапазон задаваемых муфтой тормозных моментов составлял 3÷80 Нм с шагом 2 Нм. Во время работы ветроротора скорость воздушного потока измерялась в двух точках: перед ветроротором (на расстоянии $2,5 R$ от вертикальной оси) и за ветроротором (на расстоянии $1,5 R$ от оси). При начальной нагрузке на валу в 3 Нм (сопротивление невключенной муфты) ветроротор самозапускался при скорости ветрового потока $V = 2,5-2,8$ м/с, без нагрузки – при $V = 1,8-2$ м/с.



Рис. 7. Ветроротор ИГМ-3 (2012 г.) с механизмом управления №2 в аэродинамической трубе НАУ.

Зависимость скорости вращения ветроротора n от величины полезного момента M_{net} на валу при различных скоростях ветрового потока V представлена на рис. 8. Максимальные мощности на валу получены при наименьших скоростях вращения ветроротора. Управление лопастями позволяет получить на валу вращающий момент, почти в три раза превосходящий момент, создаваемый ротором с жестко фиксированными лопастями; при этом почти вдвое снижается скорость вращения ветроротора (рис. 8).

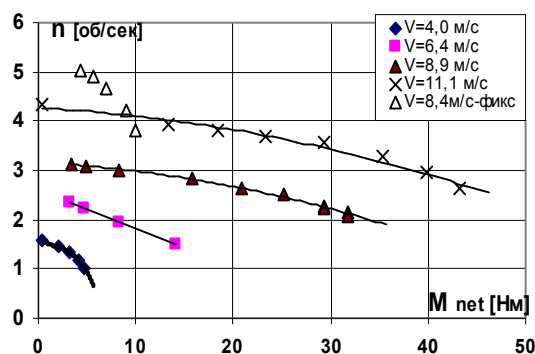


Рис. 8. Зависимости скорости вращения ветроротора n от величины нагрузочного момента M_{net} на валу при различных скоростях потока V .

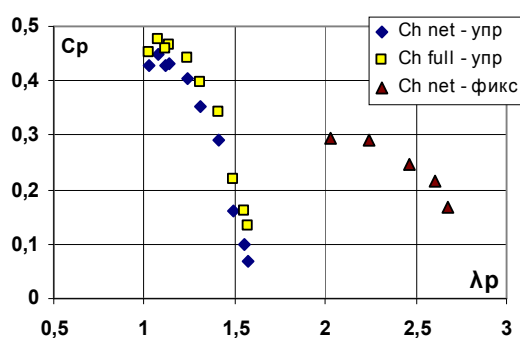


Рис. 9. Зависимости величин коэффициента использования энергии потока C_p ветроротора от величины коэффициента быстроходности λ_p при скорости ветрового потока $V = 9$ м/с.

Это хорошо видно на рис. 9, где максимум эффективности ротора с управляемыми лопастями получен при коэффициенте быстроходности $\lambda_p = 1,1$, а максимум эффективности ротора с жестко фиксированными лопастями получен при коэффициенте $\lambda_p = 2,1$. В то же время величина коэффициента $C_{p\ net}$ у ротора с управляемыми лопастями почти в 1,5 раза выше, чем у того же ветроротора с жестко фиксированными лопастями (механизм управления снят). При жестком креплении лопастей угол установки лопастей составлял 8° , что согласуется с данными, полученными в Институте МакМастер в Канаде [15] при продувке ветроротора с размерами $H \times D = 3 \times 2,5$ м (экспериментально $C_{p\ full}$ был получен там не более 0,33).

Отметим, что углы, задаваемые управляющей дорожкой ветроротора ИГМ-3, были значительно больше, чем те, которые следовало бы выбрать, используя результаты работы [8]. Кроме того, на подветренной части траектории углы атаки на профиле задавались меньшей величины,

чем на наветренной части траектории. Это связано с тем, что на лопасть, движущуюся по подветренной части траектории, ветровой поток приходит заторможенный на 20-40% (в зависимости от скорости вращения ветроротора), что подтверждается как нашими измерениями, так и данными работы [16].

Выводы. Таким образом, применение у ветророторов с вертикальной осью вращения простого в конструктивном и технологическом плане механизма управления лопастями (№2) позволит эффективно использовать его при малых (6-8 м/с) скоростях ветра, снизить величину ветровой нагрузки на вал ветроротора, значительно улучшить его рабочие характеристики. Это позволяет надеяться, что энергоустановки с роторами описанной конструкции будут весьма эффективными при использовании как воздушных, так и водных потоков (речных, морских) в качестве генераторов энергии мощностью 5-10 кВт для индивидуальных хозяйств, либо в качестве насосных установок мощностью 20-40 кВт для добычи и перекачки нефти или воды.

В заключение хотелось бы высказать искреннюю признательность за спонсирование работ по изготовлению ветророторов директору ООО "Продмаш" Я.Пыжинскому (ИГМ-1), бизнесмену из Киева Д.Бейлину (ИГМ-2) и бизнесмену из Тайваня А.Браславскому (ИГМ-3).

1. <http://cf01.erneuerbareenergien.schluetersche.de/files/smfiledata/4/7/8/6/3/2/114bSWRcaseUSA>.
2. <http://www.renewablesinternational.net/new-german-wind-growth-record-in-2014>.
3. Pernick R. The year ahead: Top clean energy trends of 2015 // www.greenbiz.com/2015/01/09.
4. RENEWABLES 2015 – Global Status Report // Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. – 2015. – 250 p. www.ren21.net.
5. Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костюков И.Ю. Ветроустановки малой мощности. – Київ: Наукова думка, 2011. – 590 с.
6. Довгий С.А., Каян В.П., Кочин В.А., Лебедь А.Г. Исследование влияния активного управления прямыми лопастями на рабочие характеристики ветроротора Дарье // Прикладная гидромеханика. – 2010. – 12. – №3. – С. 12–23.
7. Kayan V. Darrieus Turbine with Controlled Blades: The Perspective Converter of Hydrokinetic Energy // Open Journal of Renewable Energy and Sustainable Development. – 2014. – V.1. – No. 2. – P. 9–23.

8. *Sheldahl R.E., Klimas P.C.* Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack // Tech. rep. SAND 80-2114. – Sandia National Labs., Albuquerque, NM, USA. – 1981. – 120 p.

9. Пат. 84319С Україна, МПК F03D 3/00, F03D 7/06. Вітросилова установка / В.В.Гребенников, В.П. Каян, С.О. Довгий, В.А. Кочин. – Опубл. 17.07.2008. Бюл. № 19.

10. *Каян В.П., Лебедь А.Г.* Оптимізація робочих характеристик полномасштабного макета ветроротора Дарье с прямыми управляемыми лопастями // Прикладная гидромеханика. – 2010. – 12. – №4. – С. 26–35.

11. *Каян В.П., Лебедь А.Г., Чмовж В.В.* Оптимізація робочих характеристик ветроротора Дарье с прямыми лопастями // Відновлювана енергетика. – 2011. – № 1. – С. 43–54.

12. *Гринченко В.Т., Каян В.П.* Оптимізація характеристик ветроротора Дарье с прямыми управляемыми лопастями // Доповиди НАН України. – 2015. – № 6. – С. 37–45.

13. *Гребешов Э.П., Коврижных Л.Д.* Пропульсивные характеристики крыла-двигателя, работающего вблизи экранирующих поверхностей // Труды ЦАГИ. – 1983. – Вып. 2211. – С. 6–20.

14. *Довгий С.А., Голубев С.А., Лебедь А.Г., Черний Д.И.* Математические, вычислительные и технологические решения для выявления и использования нелинейных закономерностей в ветроэнергетике // Методы дискретных особенностей в задачах мат. физики: Труды XV Международного симпозиума (МДОЗМФ–2011), 2011. – С. 175–180.

15. *Fiedler A.J., Tullis S.* Blade Offset and Pitch Effects on a High Solidity Vertical Axis Wind Turbine // Wind Engineering. – 2009. – V. 33. – No.3. – P. 237–246.

16. *Horiuchi K., Ushiyama I., Seki K.* Straight wing vertical axis wind turbines: A flow analysis // Wind Engineering. – 2005. – V. 29. – No. 3. – P. 243–252.

УДК 621.548

З.К.Сандовал (НТУУ "КПІ", Київ)

Аналіз потоків енергії вітру Республіки Еквадор

У статті наводяться результати аналізу потоків енергії вітру в Еквадорі. Отримані дані будуть використані для оцінки можливості встановлення автономних вітроелектричних установок переважно в районах, що знаходяться у сільській місцевості.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроенергетичний потенціал, вітроелектрична установка.

В статье приведены результаты анализа потоков энергии ветра в Эквадоре. Полученные данные будут использованы для оценки возможности размещения автономных ветроэлектрических установок преимущественно в сельской местности.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроэнергетический потенциал, ветроэлектрическая установка.

Сучасна Республіка Еквадор – це країна, що динамічно розвивається, змінює вектори експорту товарів і послуг, проводить пошук нових напрямків у виробничих питаннях та в поліпшенні умов життя населення. Еквадор має площу 270670 км² і населення більше 15 млн жителів (дані 2010 р.) [1]. Економіка базується на експорті нафти (до 40% доходу) та сільськогосподарських продуктів [2, 8]. У той же час, за офіційними даними урядових організацій Еквадору, запаси нафти в країні становлять 8832,0 млн барелів [3].

Завдяки реалізації Національної програми розвитку в 2009-2013 рр. була проведена електрифікація країни, яка охопила 98% міських та 96% сільських домогосподарств. Проте дефіцит електроенергії спостерігається в районних провінціях Амазонки [4]. Структура виробництва енергії в країні [4]

наведена в таблиці 1.

Таблиця 1. Структура виробництва енергії

Вид енергії	Е, ГВт-год	Частка, %
Традиційна	12398,68	49,65
Імпорт	836,19	3,34
Відновлювана:		
гідроенергетика	11287,30	45,2
вітроенергетика	79,72	0,32
фотоенергетика	14,38	0,06
енергія біомаси	357,57	1,43
Всього	24973,84	100%

Як видно з таблиці, більша частина енергії генерується на паливних станціях. В останні роки уряд взяв курс на виробництво енергії за допомогою гідроелектростанцій, частка яких вже склала майже половину виробітку. Якщо територію країни умовно розбити на чотири регіони (гірський,