

## Теоретический анализ ветродвигателя с поворотными лопастями

*Петр Краснолуцкий, Юрий Панцир*

Подольский государственный аграрно-технический университет  
Ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, Украина, e-mail: kraspp@ukr.net

**Аннотация.** В статье обоснована целесообразность разработки ветродвигателя с вертикальным валом и автоматической ориентацией лопастей на основе ветродвигателя с поворотными лопастями конструкции инженера Ф. Быкова. Этому ветродвигателю присущи те же преимущества, что и другим конструкциям вертикально-осевых ветродвигателей – простое устройство, не требующее механизма ориентации на ветер, высокий пусковой крутящий момент. Кроме этого, отличием указанного ветродвигателя является увеличенный рабочий ход (до 270°). Специфика движения лопастей потребовала проведения кинематического и динамического анализа ветродвигателя, в результате которого авторами получены аналитические зависимости, описывающие векторы аэродинамических сил, траекторию движения лопасти и величину крутящего момента при различных углах ее поворота. На основании этого предложены дополнительные конструктивные изменения, повышающие стабильность вращения и коэффициент использования энергии ветра.

**Ключевые слова:** ветродвигатель, ротор вертикальный, лопасть поворотная, крепление шарнирное, миделя площадь, векторы скорости.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В современной промышленной ветроэнергетике приоритетным является производство и внедрение крупных ветроэнергетических установок (ВЭУ) мощностью 60 кВт и выше, рассчитанных на скорость ветра от 10 м/с. В большинстве таких установок используются крыльчатые малоллопастные ветродвигатели с горизонтальной осью вращения, важнейшим принципиальным преимуществом которых есть наиболее высокий по сравнению с другими конструкциями коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ) [1]. Подобные установки применяют, прежде всего, в развитых странах, территории которых практически полностью электрифицированы и где по сути отсутствует массовый потребитель мало-

мощных ВЭУ для автономного электроснабжения. Но в ряде других стран, в том числе и в Украине, потребность в маломощных ВЭУ достаточно велика [2-4], что и обусловило возрастающий интерес к их разработке.

В этом аспекте, по мнению многих специалистов, несмотря на сравнительно низкий коэффициент использования энергии ветра, присущий ветродвигателям вертикально-роторного типа, они остаются перспективным направлением для конструирования ветроустановок малой мощности, поскольку не требуют специального механизма ориентации «на ветер», позволяют расположить генератор на земле, имеют высокий пусковой и рабочий крутящий момент [1; 5-6]. Разработка их многочисленных конструкций продолжается как профессиональными инженерами, так и любителями в направлении повышения КИЭВ [7-8], что также является основной целью наших исследований.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Фундаментальные классические положения теории ветродвигателей были разработаны в середине XX века и изложены в ряде известных трудов [1, 7], которые до сих пор являются основой для современных ученых, занимающихся изучением отдельных важных вопросов ветроэнергетики. В частности, проблемами трансформации энергии ветрового потока в работу исполнительных машин и механизмов занимались П.Ф. Васько [9], Солдатенко В. Кубкин М., Вихрова Л. [10], Сиротюк С. [11-12]. Аэродинамика вертикально-осевых ветродвигателей исследовалась Климиной Л.А. [6], Волковым Н.И. [13]. Важные вопросы общей компоновки ветроустановок малой мощности раскрыты в трудах Д.А. Морозова [14], Жогалева А.П. [15], ряда других ученых. Результаты исследований позволили сформулировать прикладные

методики расчета основных параметров и режимов работы ветроустановок [16-18], достаточно простые для использования конструкторами и практиками.

Но, как правильно отмечает Л. Климина, моделирование аэродинамического воздействия на лопасти вертикально-осевого ветродвигателя до сих пор не имеет общей теоретической платформы [6]. При вращении ротора положение лопасти относительно потока воздуха непрерывно изменяется, что кардинально усложняет исследования аэродинамики вертикально-осевого ротора по сравнению с горизонтально-осевым. Поэтому для расчета обтекания лопастей применяют модели, опирающиеся на применение численных методов при рассмотрении: 1) трубки тока (streamtubetheory), 2) системы трубок тока (multiplestreamtubemethod), 3) сходящих вихрей (vortexmethod), 4) комбинации трубки тока и сходящих вихрей (localcirculationmodel). В этих моделях используются данные о коэффициентах сопротивления и подъемной силы, как правило, получаемые из экспериментов, и затем пересчитываемые на нестационарный случай на основе некоторых дополнительных предположений [6, 8, 13]. То есть каждая принципиальная схема ветродвигателя по сути требует отдельной методики теоретического анализа.

При рассмотрении известных конструкций ветроустановок карусельного типа наше внимание привлекла идея инженера Ф. Быкова, в которой предложено шарнирное крепление лопасти к лонжерону с ограничением угла ее поворота [19]. По мнению автора идеи, для такой конструкции зона холостого хода лопасти (против ветра) может составлять лишь  $90^\circ$ , а рабочий ход  $270^\circ$  против  $120 \dots 180^\circ$  для типичных карусельных ветродвигателей. Но ни теоретических, ни экспериментальных исследований такого ветродвигателя, судя по доступным публикациям, не проводилось.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С учетом изложенного была сформулирована следующая задача: получить аналитические выражения, характер движения вертикально-осевого ветродвигателя с поворотными лопастями, на их основании обосновать конструктивное исполнение указанного ветродвигателя и определить дальнейшие направления исследований.

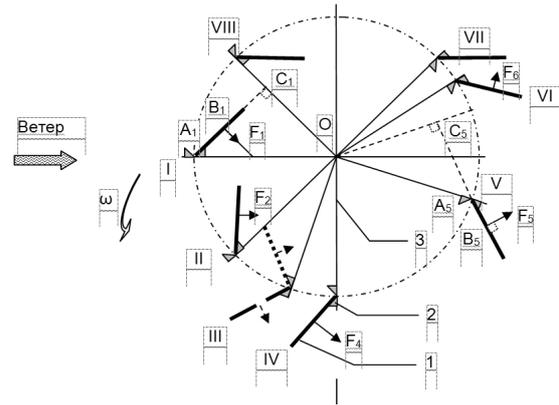
## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Проанализируем схему ветродвигателя рис. 1.

Из схемы сразу можно сделать ряд выводов.

Во-первых, холостой ход лопасти действительно может составлять теоретически около  $90^\circ$  (зона поворота VII-VIII), о чем свидетельствует направление вектора аэродинамической силы.

Во-вторых, воспользовавшись определенной аналогией, предлагаем дополнить лопасть усиливающим элементом по типу закрылка крыла самолета с углом отклонения от плоскости лопасти  $\xi = 15 \dots 30^\circ$  и площа-



**Рис. 1.** Схема к кинематическому анализу ветродвигателя (в плане): 1 – лопасть; 2 – ограничитель; 3 – лонжерон; I... VIII – характерные точки;  $F_1 \dots F_6$  – сила давления ветра на лопасть в характерных точках;  $OC_1, OC_5$  – плечо действия силы  $F_i$

**Fig. 1.** Scheme to the kinematic analysis of the wind turbine (in plan): 1 – blade; 2 – limiter; 3 – longeron; I ... VIII – distinguished points;  $F_1 \dots F_6$  – the power of the wind pressure on the blade at distinguished points;  $OC_1, OC_5$  – arm of force  $F_i$

дью  $15 \dots 20\%$ . По данным продувок крыльев, при таких соотношениях и определенных углах атаки основной лопасти эффект от закрылка по подъемной силе может вырасти на  $20 \dots 30\%$ . В большинстве случаев этот угол для монопланной поверхности составляет  $1 \dots 15^\circ$ . На всех остальных углах атаки наличие закрылка может ослаблять срыв потока воздуха с края лопасти [20, 21].

Важным моментом есть также то, что следует выделить особенную зону поворота ротора в диапазоне  $45-90^\circ$ . Предположим, ротор имеет 24 лопасти, расположенных в характерных точках (через  $15^\circ$  поворота лонжерона вокруг оси) и движение осуществляется в идеальных условиях (без учета стробоскопического эффекта, аэродинамической тени от смежных лопастей). В таком случае можно считать, что центр силы давления ветра не перемещается по профилю лопатки, а зафиксирован по ее центру.

Как следует из рис. 2, при углах поворота  $60 \dots 75^\circ$  ориентация лопасти неопределенная, она может занимать любое положение относительно ограничителя. Очевидно, что для усиления крутящего момента необходимо обеспечить быстрый разворот лопатки из положения III-A в положение III-B, что можно сделать с помощью дополнительного флюгерного элемента. В результате предлагаемого конструкции лопасти можно изобразить схематически рис. 3.

Соединив центры лопастей на рис. 2, получим замкнутую кривую, которая четко показывает, что их расстояние от оси вращения не является постоянной величиной, а изменяется в зависимости от сектора пребывания лопасти. Так же очевидно, что не будет постоянной и площадь миделя лопасти (то есть площадь проекции на плоскость, перпендикулярную к набегающему потоку).

Для дальнейшего анализа нами принята расчетная мощность ветродвигателя  $N = 5$  кВт, поскольку, по

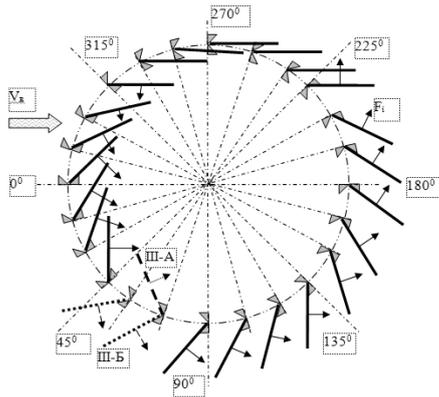


Рис. 2. Условный «стоп-кадр» 24-лопастного ротора (идеализированный вариант)

Fig. 2. Conventional “stop-motion” of 24-bladed rotor (idealized version)

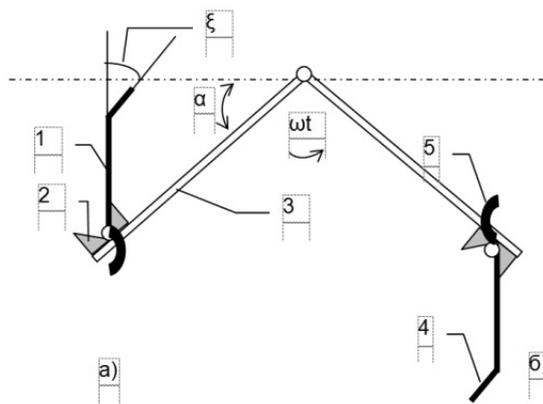


Рис. 3. Схема к описанию устройства лопасти: 1 – лопасть; 2 – ограничитель; 3 – лонжерон; 4 – закрылок; 5 – флюгер; положения лопасти при угле поворота лонжерона  $\alpha = \omega t$ : а)  $\alpha = 45^\circ$ ; б)  $\alpha = 135^\circ$

Fig. 3. Scheme to the description of the blade structure: 1 – blade; 2 – limiter; 3 – longeron; 4 – flap; 5 – vane; motion of blade at an angle of rotation of longeron  $\alpha = \omega t$ : а)  $\alpha = 45^\circ$ ; б)  $\alpha = 135^\circ$

мнению многих исследователей, ветродвигатели такой мощности наиболее целесообразны для использования в частных приусадебных хозяйствах [4;14]. Как известно из теории ветродвигателей, мощность виндротора определяется по формуле:

$$N = 0,5\rho S\varphi V^3, \tag{1}$$

где:

- $\rho$  – плотность воздуха,
- $\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$ ,
- $S$  – площадь ветродвигателя, ометаемая ветром,  $\text{м}^2$ ,
- $\varphi$  – коэффициент восприятия энергии ветра, считаем  $\varphi = 0,32$ ;

Принимая высоту установки  $H=20$  м (из тех соображений, что сооружения высотой до 30 м не требуют специального разрешения), по методике М.М. Рыкачева [5] устанавливаем ориентировочно скорость воздушного потока  $V_\phi = 9,6 \text{ м/с}$ .

Из формулы 1 находим необходимую площадь виндротора:

$$S_{\max} = \frac{2N}{\rho * \varphi * V_f^3} = \frac{2 * 5000}{1.23 * 0.32 * 9.6^3} = 15.7 \text{ м}^2. \tag{2}$$

Принимаем соотношение между диаметром виндротора и его высотой  $D_p/H_p = 1:1$ . Тогда размеры виндротора:

$$D_p = H_p = \sqrt{S_{\max}} = 4 \text{ м}. \tag{3}$$

Для ветродвигателей карусельного типа оптимальный коэффициент быстроходности  $z = 0,9 \dots 1,0$  [1; 5; 18], то есть линейная скорость лопасти совпадает со скоростью ветра. В таком случае угловая скорость вращения ветродвигателя в номинальном режиме:

$$\omega = \frac{V_f}{zR} = \frac{9,6}{1,9} = 5,1 \text{ с}^{-1}, \tag{4}$$

где:

$R$  – радиус точек крепления лопаток, м.

Средний крутящий момент, развиваемый ветродвигателем:

$$M_{pc} = \frac{N}{\omega} = \frac{5000}{5,1} = 980 \text{ Нм}, \tag{5}$$

В действительности сила и момент на лопасти будут не стабильными, а пульсирующими, и для уточнения характера работы ветродвигателя продолжим его кинематический анализ. Рассмотрим исходное положение I лопасти на рис.4а.

Через центр ротора т. О проведем линию  $OC_1$ , параллельную направлению силы  $F_1$ . Тогда из прямоугольного треугольника  $A_1C_1O$  легко определить плечо действия силы  $F_1$ :

$$L_i = E_1C_1 = OA_1 \cos \beta - \frac{A_1E_1}{2} = R \cos \beta - 0,5 * B, \tag{6}$$

где:

- $\beta$  – угол между лопастью и лонжероном,
- $B$  – ширина лопасти, м.

Как видно из схемы, эта закономерность справедлива для положения лопасти в пределах поворота ротора  $0 \dots 45^\circ$  и  $315 \dots 360^\circ$ . Для других углов поворота ротора (например, в положении IV):

$$L_4 = E_4C_4 = OA_4 \cos \beta + \frac{A_4E_4}{2} = R \cos \beta + 0,5B, \tag{7}$$

Итак, на дуге поворота ротора  $45^\circ < \alpha < 225^\circ$  плечо действия силы  $F$  увеличивается на ширину лопасти. Но утверждать, что одновременно пропорционально увеличивается крутящий момент нельзя, так как при этом изменяется площадь миделя лопасти и ее угол атаки.

Характер изменения площади миделя можно определить путем элементарной геометрического построения (рис. 4б).

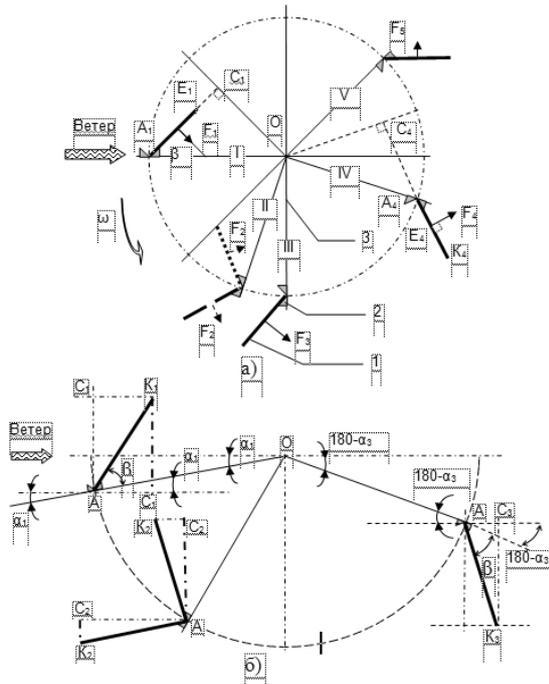


Рис. 4. Схемы к теоретическому анализу ротора: а) для определения плеча действия силы  $F_i$ ; б) для определения площади миделя лопасти

Fig. 4. Schemes for the theoretical analysis of the rotor: a) to determine arm of force  $F_i$ ; b) for determining the area of blade's the mid-section

Допустим, первое положение лопасти соответствует углу поворота ротора на величину  $0^\circ < \alpha_1 < 45^\circ$ . Ширина миделя здесь равна длине катета:

$$[C_1 K_1] = [A_1 K_1] \sin(\alpha_1 + \beta) = B \sin(\alpha_1 + \beta). \quad (8)$$

Поэтому и площадь миделя на этом участке:

$$S_{M1} = S_L \sin(\alpha_1 + \beta). \quad (9)$$

Это же соотношение справедливо и для участка траектории  $\alpha_1 = 315 \dots 360^\circ$ . На участке траектории  $90^\circ < \alpha_3 < 225^\circ$  иное соотношение:

$$S_{M3} = S_L \sin(\alpha_3 - \beta). \quad (10)$$

Результаты расчетов, выполненные с помощью пакета программ Excel, представлены графически рис. 5-6.

Полученные данные свидетельствуют, что при принятых габаритах лопасти наибольшая площадь ее миделя соответствует повороту ротора на  $60 \dots 125^\circ$ . Очевидно, что в этом положении максимальны также сила аэродинамического давления и крутящий момент. Отсюда можно сделать предварительный вывод, что для устранения пульсаций мощности, момента и угловой скорости целесообразно ротор оборудовать четырьмя или шестью лопатками, расположенными попарно. Однако этот вывод следует проверить экспериментально, поскольку на данном этапе исследований нет возможностей учесть взаимное влияние смежных лопастей. Для

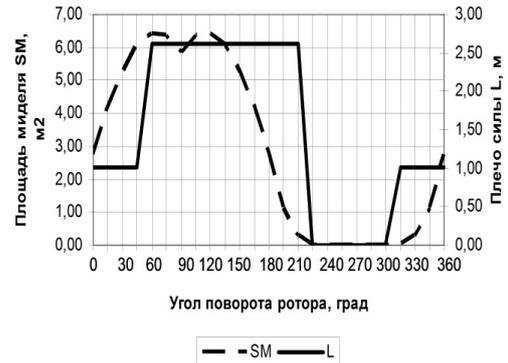


Рис. 5. Характер изменения площади миделя лопасти  $S_M$  и плеча действия  $L$  аэродинамической силы при повороте ротора

Fig. 5. Behavior of the area of the blade mid-section and arm of action  $L$  aerodynamic force during rotation of the rotor

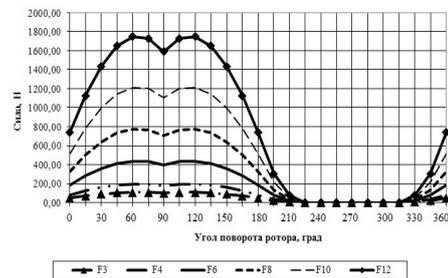


Рис. 6. Изменение аэродинамической силы  $F_i$  при повороте ротора и различной скорости ветра  $V$  (метеорологическое значение):  $F_3$  – при  $V = 3$  м/с;  $F_4$  – при  $V = 4$  м/с;  $F_6$  – при  $V = 6$  м/с;  $F_8$  – при  $V = 8$  м/с;  $F_{10}$  – при  $V = 10$  м/с;  $F_{12}$  – при  $V = 12$  м/с

Fig. 6. Change of aerodynamic force  $F_i$  during rotating of the rotor and varying wind speed  $V$  (meteorological term):  $F_3$  – with  $V = 3$  m/s;  $F_4$  – with  $V = 4$  m/s;  $F_6$  – with  $V = 6$  m/s;  $F_8$  – at  $V = 8$  m/s;  $F_{10}$  – at  $V = 10$  m/s;  $F_{12}$  – with  $V = 12$  m/s

этого нами изготовлена модель ветродвигателя и проведены соответствующие опыты.

Бесспорно, составляют весомый интерес также влияние таких факторов, как форма лопастей, их расположение в вертикальной плоскости, возможный угол отклонения лопасти относительно точки крепления к лонжерону. Но в связи с ограниченными техническими возможностями мы ориентировались только на проведение однофакторного эксперимента, при котором за фактор влияния принята скорость воздушного потока  $V_n$ .

Лабораторная установка представляет собой изготовленный в масштабе 1:10 макет ротора, геометрически подобный натурному образцу, но с возможностью установки 3 или 4 лопастей. Опорой ротора служит корпус, в котором смонтирован электрогенератор. В данном случае нами был применен в качестве электрогенератора шаговый электродвигатель от широкополосного принтера Robotron SPA 52 / 60-5689 NDK, имеющий шаговый параметр 60 / шаг, номинальное напряжение 24 В и ток 1,2 А.

Во время поисковых экспериментов установлено, что вариант с тремя лопастями практически неработоспособен: ветродвигатель разогнался медленно, рывками, пе-

риодически тормозят. Причиной таких «скачков» является то, что в положении поворота  $0 \dots 75^\circ$  лопасть закрывает собой от ветра предыдущую, которая находится на дуге поворота  $90 \dots 180^\circ$ . Подобная ситуация возникает и при работе ротора с 4 лопастями. Здесь также возникает аэродинамическая тень, хотя и на более коротком участке поворота ротора, но такая, что полностью перекрывает проход ветра к следующей лопасти. Существенно ослабить этот эффект можно следующими способами:

- 1) расположить по 2 лопасти в 2 яруса по вертикали; недостаток – высота конструкции, соответственно, растет практически в два раза,
- 2) выполнить лопасти не сплошными, а с вертикальными окнами вблизи оси крепления для пропуска воздуха к следующей лопасти (рис. 7).

В дальнейших экспериментальных исследованиях усовершенствованной модели было установлено превышение частоты вращения ротора во время опытов против расчетного значения (на  $15 \dots 20\%$  во всем исследованном диапазоне), что можно объяснить неучтенным в теоретическом анализе динамическим эффектом от разворота лопасти на дуге поворота ротора  $45 \dots 125^\circ$ .

Разворачиваясь, лопасть приобретает дополнительный момент инерции, который в указанной части траектории создает толкающий импульс. Есть основания считать, что некоторому увеличению угловой скорости, как это ни парадоксально, способствует флюгирование лопасти на участке холостого хода, поскольку по принципу д'Аламбера для вращающегося тела, уменьшение радиуса поворота его центра тяжести приводит к увеличению частоты вращения. Но поскольку воспринятая ротором энергия ветра остается постоянной величиной, ее «перераспределение» на увеличение угловой скорости автоматически проявляется в уменьшении крутящего момента.

Указанное явление требует более детального изучения, но реальных возможностей для этого у нас пока нет. В частности, требуется высокоскоростная видеосъемка или тензометрическая аппаратура для определения продолжительности разворота лопасти, мгновенного ускорения или торможения ротора, перераспределения давления и дрейфа его условного центра по поверхности лопасти, траектории и скорости ветра внутри контура лопастей, их взаимного влияния. В силу этих же причин мы не можем пока детализировать влияние размеров и кривизны закрылка и флюгера на характер движения ротора.

## ВЫВОДЫ

1. Несмотря на сравнительно низкий коэффициент использования энергии ветра, присущий ветродвигателям вертикально-роторного типа, по мнению многих специалистов, они остаются перспективным направлением для конструирования ветроустановок малой мощности, поскольку не требуют специального механизма ориентации «на ветер», позволяют расположить генератор на земле, имеют высокий пусковой и рабочий крутящий момент. Проведенный кинематический анализ вертикально-осевого ветродвига-



Рис. 7. Лабораторная модель ветродвигателя (вариант лопастей с окнами)

Fig. 7. Laboratory model of a wind turbine (variant blades with windows)

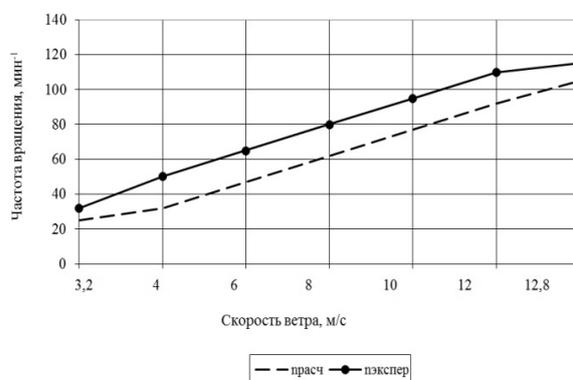


Рис. 8. Частота вращения ротора при разной скорости воздушного потока

Fig. 8. Rotor speed at different air flow rate

теля с поворотными лопастями по принципиальной схеме Ф. Быкова показал, что данный ветродвигатель имеет еще одно важное преимущество: зона холостого хода лопасти (против ветра) может составлять лишь  $90^\circ$ , соответственно рабочий ход  $270^\circ$  против  $120 \dots 180^\circ$  для типовых карусельных ветродвигателей. Для ускорения разворота лопасти на участке поворота ротора  $45 \dots 90^\circ$  лопасти целесообразно оборудовать дополнительным флюгерным элементом. Кроме того, для усиления аэродинамической силы предлагаем дополнить лопасть элементом по типу закрылка крыла самолета с углом отклонения от плоскости лопасти  $\xi = 15 \dots 30\%$  и площадью  $15 \dots 20\%$  площади лопасти. По данным классической аэродинамики, при углах атаки основной монопланной лопасти  $1 \dots 15^\circ$  эффект от такого закрылка по подъемной силе может вырасти на  $20 \dots 30\%$ . На всех других углах атаки наличие закрылка может ослаблять срыв потока воздуха с края лопасти, снизив тем самым ее сопротивление обдуванию ветром.

2. Важным выводом из проведенного кинематического анализа и полученных аналитических зависимостей является то, что на дуге поворота ротора  $45^\circ < \alpha < 225^\circ$  плечо действия силы аэродинамического давления  $F$  увеличивается на ширину лопасти. Наибольшая

- площадь ее миделя соответствует повороту ротора на  $60...125^\circ$ ; в этом положении сила аэродинамического давления и крутящий момент максимальны.
- Во время поисковых экспериментов установлено, что варианты с тремя и более лопастями практически неработоспособны: ветродвигатель разгонялся медленно, рывками, периодически тормозил. Причиной таких «скачков» является то, что в положении поворота  $0 \dots 75^\circ$  лопасть закрывает собой от ветра предыдущую, которая находится на дуге поворота  $90 \dots 180^\circ$ . Существенно ослабить этот эффект можно двумя способами: выполнив лопасти не сплошными, а с проходными окнами, или расположив лопасти попарно не более двух лопастей в каждом. Второй способ представляется нам более рациональным.
  - Анализ графиков изменения силы аэродинамического давления и крутящего момента, которые носят явно выраженный циклический характер, позволяет предположить, что при определенных условиях может возникнуть их резонансное увеличение. Однако эта гипотеза требует отдельного теоретического анализа и экспериментальной проверки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Рензо Д. 1982.** Ветроэнергетика / Под ред. Д. Рензо: Пер. с англ.; М.: Энергоатомиздат, 264.
- Драганов Б.Х. 1988.** Использование возобновляемых и вторичных энергоресурсов в сельском хозяйстве. – К.: Вищ. шк., 98.
- Корчемный Н.А., Машевский В.П., Головкин В.М. 1989.** Использование энергии солнца и ветра в сельском хозяйстве Украины. – К.: УНИИМЕСХ, 88.
- Онишко О.Ф., Коробко Б.П., Миханюк В.М. 2006.** Малая ветроэнергетика. – К.: УАН: Энергетика. Вып. 2, 58. (Украина).
- Фатеев Е.М. 1957.** Ветродвигатели. – М.: Машгиз, 323.
- Климина Л.А. 2010.** Вертикально-осевая ветротурбина: динамика и управление: дисс. ... канд. физико-математических наук: 01.02.01- М.: МГУ, 123.
- Германович В., Турилин А. 2011.** Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы. – СПб: Наука и техника, 320.
- Каталог патентов на ветроэнергетические установки Available online at: <<http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7722.html>>.
- Васько П.Ф. 1998.** Системы электромеханического преобразования энергии ветра: автореф. дис. доктора техн. наук: 05.14.07. – К.: Институт электродинамики НАН Украины, 33. (Украина).
- Солдатенко В., Кубкин М., Вихрова Л. 2014.** Имитационная модель гибридной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2014. Vol.16. No 4. 233-241.
- Сиротюк С. 2012.** Управление режимами работы автономной ветроэлектрической установки // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2012. Vol.14. No 4. 126-131.
- Сиротюк В., Боярчук В., Воробкевич В., Сиротюк С., Гальчак В., Фурман А. 2012.** Обоснование структуры передаточных устройств ветроэлектрических установок сельскохозяйственного назначения // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2012. Vol.14. No 4. 75-84.
- Волков Н.И. 1997.** Математические модели течений и расчет аэродинамических характеристик ортогональных ветродвигателей: дисс. доктора техн. наук: 05.14.07. – К.: НТТУКПИ, 227. (Украина).
- Морозов Д.А. 2011.** Синтез ветроустановки малой мощности с вертикальной осью вращения: дисс. канд. техн. наук: 05.02.18 – Ижевск: ГОУВПО ИГТУ, 126.
- Жогаев А.П. 2004.** Роторная ветроэнергетическая установка для автономного электроснабжения рассредоточенных сельскохозяйственных объектов (для условий Ростовской области): автореф. дис. канд. техн. наук 05.20.02. – Зерноград: АЧГАА, 24.
- Кирюшатов А.И. 1991.** Использование нетрадиционных возобновляющихся источников энергии в сельскохозяйственном производстве. – М.: Агропромиздат, 190.
- Кудря С.О., Головкин В.М. 2009.** Основы конструирования энергоустановок с возобновляемыми источниками энергии – К.: НТУУКПИ, 201. (Украина).
- Яковлев А.И., Затучная М.А. 2002.** Расчет ветротурбин с вертикальной осью вращения: Учеб. пособие по курсовому проектированию. – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 61.
- Быков Ф. 1990.** Форсированный ветряк // Изобретатель и рационализатор. № 8, 11.
- Брюханов О.Н., Коробко В.И., Мелик-Аракелян А.Т. 2005.** Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики. – М.: Инфра-М, 252.
- Гребеньков О.А. 1984.** Конструкция самолетов. – М.: Машиностроение, 240.
- Никитин А., Баканов Е.А. 1984.** Основы авиации. – М.: Транспорт, 261.

#### THEORETICAL ANALYSIS OF WIND TURBINES WITH ROTATING BLADES

**Summary.** The article proves feasibility of developing a Vertical axis wind turbine with automatic blade orientation based on a wind turbine with rotating blades designed by engineer F. Bykov. This wind turbine has the same advantages as other designs of vertical-axis wind turbines, including a simple device that does not require a mechanism of orientation to the wind, a high starting torque. Besides, increased working stroke (up to  $270^\circ$ ) differ this wind turbine. The specifics of blades' motion demanded a kinematic and dynamic analysis of the wind turbine. As a result, the authors got analytical dependences which describe vectors of aerodynamic forces, the trajectory of blade motion and torque capacity at different angles of its rotation. Based on that, additional structural changes that improve stability of rotation and usability of wind energy are suggested.

**Key words:** wind turbine, the rotor vertical, rotating blade, hinging, the mid-section area, velocity vectors.