

УДК 621.548

**В. М. Зырянов, Л. Г. Лимонов**, кандидаты техн. наук,  
**В. М. Роткин, Ю. Б. Соколовский**, кандидаты техн. наук

### ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ЛОПАСТНЫХ ВЕТРОТУРБИН

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы усовершенствования управляемых вертикально-осевых ветротурбин, которые могут быть широко использованы в промышленных и бытовых установках, как альтернативные источники энергии. Предлагаемые методики расчета направлены на повышение эффективности работы ветровых энергетических установок.

*Ключевые слова:* ветротурбина, лопасть, крыло, воздушный поток, энергоэффективность, оптимизационная модель, численный эксперимент, техническое решение, лобовое сопротивление, циклический силовой момент

**В. М. Зырянов, Л. Г. Лимонов**, кандидаты техн. наук,  
**В. М. Роткин, Ю. Б. Соколовский**, кандидаты техн. наук

### ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КЕРОВАНИХ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВИХ ЛОПАТЕВИХ ВІТРОТУРБІН

*Анотація.* Розглянуто питання вдосконалення керованих вертикально-осьових турбін, що можуть бути широко використані в промислових і побутових установках, як альтернативні джерела енергії. Пропоновані методики розрахунку спрямовані на підвищення ефективності роботи вітрових енергетичних установок.

*Ключові слова:* вітротурбіна, лопать, крило, повітряний потік, енергоефективність, оптимізаційна модель, чисельний експеримент, технічне рішення, лобовий опір, циклічний силовий момент

**V. M. Ziryaynov, Ph.D., L. G. Limonov, Ph.D.,**  
**V. M. Rotkin, Ph.D., U. B. Sokolovsky, Ph.D.**

### INCREASE ENERGY EFFICIENCY DRIVEN VERTICAL-AXIS BLADE WINDTURBINE

*Abstract.* Systems of forced cooling of large power electrical machines - motors and generators using industrial fans, is widely extend in such industrial applications as hot rolling mills and cold rolling mills, mine elevating machines. Lack of automated control systems of fans electric drives leads to significant cost overruns electricity, particularly in the case of cyclic loading cooled electrical machines.

Described in the article of the automated control system of electric cooling fans of powerful electric motors for mine hoists can significantly reduce the power consumption of the said electric.

This automatic control system built using frequency converters for speed control of fans electric motors and control of programmable controllers. Control algorithm implemented in software controller determines the required number entered fans and their speed of rotation, providing a minimum energy consumption fan motors to maintain the desired temperature motors mine hoists when they work cyclic.

*Keywords:* windturbine, blade, wing, airflow, energyefficiency, optimizationmodel, numericalsimulation, technicalsolution, drag, cyclic-skypowerpoint

**Введение.** В [1] получены основные соотношения, описывающие оптимизационную модель взаимодействия лопасти вертикально-осевой ветротурбины (ВОВ) с воздушным потоком (ВП), которые позволяет определить кинематику лопасти, обеспечивающую максимальный съем энергии ВП [2–3]. С помощью полученных соотношений выполнено исследование параметров лопасти ветротурбины, результаты которого приведены ниже.

© Зырянов В.М., Лимонов Л.Г.,  
Роткин В.М., Соколовский Ю.Б., 2016

**Постановка задачи.** Исследование зависимости  $N_0(\varphi)$  на экстремум дает возможность выявить оптимальную ориентацию лопастей ветротурбины, в зависимости от расположения осей, то есть определить оптимальное соотношение  $\varphi = \varphi(\alpha)$ . После преобразований условие экстремума приобретает вид:

$$\operatorname{tg}(2\varphi - \alpha) = \frac{\frac{1+k\sin\alpha}{k\cos\alpha} + \frac{s_3}{1-s_2}}{1 \mp \frac{1+k\sin\alpha}{k\cos\alpha} \frac{s_3}{1-s_2}} \quad (1)$$

Представить соотношение  $\varphi = \varphi(\alpha)$  в явном виде [1] (рис. 1), применив теорему синусов, после преобразований можно определить

угол  $\delta$ , характеризующий угловое отклонение относительно ВП

$$tg\delta = k\cos\alpha/(1+k\sin\alpha). \quad (2)$$

Величина обратная  $(1+k\sin\alpha)/k\cos\alpha$  характеризует тангенс угла, дополняющего угол  $\delta$  до прямого

$$tg\gamma = (1+k\sin\alpha)/k\cos\alpha. \quad (3)$$

Если ввести в рассмотрение угол «дополнительного оптимального поворота»  $\lambda$ , характеризующий эффект продольного действия ВП, который рассчитывается из зависимости

$$tg\lambda = \frac{s_3}{1-s_2}, \quad (4)$$

то сопоставление выражений для  $tg(2\beta-\alpha)$ ,  $tg\gamma$  и  $tg\lambda$  дает соотношение

$$tg(2\varphi - \alpha) = tg(\gamma \pm \lambda). \quad (5)$$

Соответственно, в явном виде решение  $\varphi(\alpha)$  приобретает вид

$$\varphi = (\alpha + \gamma \pm \lambda)/2. \quad (6)$$

Здесь углы  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\lambda$  представляются своими главными значениями в диапазоне от  $-\pi/2$  до  $\pi/2$ , в частности:

$$\gamma = \arctg((1+k\sin\alpha)/k\cos\alpha), \quad (7)$$

$$\lambda = \arctg(s_3/(1-s_2)), \quad (8)$$

причем, значение угла  $\lambda$  прибавляется (+) при нахождении лопасти в первом или четвертом квадрантах ( $\alpha$  от  $-\pi/2$  до  $\pi/2$ ) и вычитается (-) во втором и третьем квадрантах.

Следует обратить особое внимание на эффект инверсии лопасти при ее оптимальном ориентировании – скачкообразных изменениях угла ориентации  $\varphi$  при значениях  $\alpha$ , равных  $90^\circ$  и  $270^\circ$  ( $-90^\circ$ ). Это эффект характерен для несимметричных «односторонних» лопастей и требует специальных технических средств [4] для реализации таких особых режимов работы ВОВ.

#### Идеальная плоская плоскость

Под идеальной понимается тонкая плоская лопасть. В которой отсутствуют продольные эффекты взаимодействия с ВП, как лобовое сопротивление, так и подъемная сила ( $s_2 = 0$ ;  $s_3 = 0$ ) [5 – 6]. В связи с отсутствием эффекта подъемной силы, угол дополнительного поворота лопасти  $\lambda=0$ , и оптимальная ориентация лопасти определяется соотношением

$$\varphi = (\gamma + \alpha)/2. \quad (9)$$

Вопрос оптимального положения лопастей при движении их на малых скоростях по круговой орбите в ВОВ ранее был рассмотрен в [7 – 8]. В общем случае оптимальное положение лопасти (в продольном направлении  $Oz$ ) определяется биссектрисой угла, образуемого векторами относительной и переносной скоростей ВП (рис. 1). При этом действующая сила  $F=F_1$  направлена по нормали к лопасти. Характерно, что вращающий момент силы  $F$ , ни при каком положении ротора не принимает отрицательных значений. Картина оптимальной ориентации лопастей существенно зависит от скоростного режима турбины. Если при низких окружных скоростях ( $k < 1$ ) режим «флюгерования», когда лопасть устанавливается параллельно ВП потоку, возникает только при  $\alpha=90^\circ$ , то при  $k > 1$  этот режим распространяется и на  $\alpha=270^\circ$  ( $-90^\circ$ ). Более того, поведение функции  $\varphi(\alpha)$  при существенном росте окружной скорости -  $\lim_{k \rightarrow \infty} \varphi = \alpha$ , отражает факт асимптотического приближения лопасти к тангенциальному положению в любой точке круговой траектории крыла.

Рассмотрим ВОВ с заданным направлением вращения, работающую в 4-х квадрантах ВП, т.е. полностью использующую энергию ВП в пределах его ометаемой площади.

На рис. 2 изображена гипотетическая ВОВ, в которой лопасти 1 расположены в 4-х квадрантах относительно вектора ВП перпендикулярно своим штангам 3. Для того, чтобы обеспечить заданное направление вращения ВОВ ее лопасти 1 в 1-м и 4-м квадрантах ( $0-90$  гр,  $270-360$  гр) должны находиться левее штанг 3 относительно вала 2, а в 3-м и 4-м квадрантах ( $90$  гр,  $-270$  гр.) лопасти 1 должны находиться правее штанг 3 относительно вала 2 (см. действие сил  $F$  на различных участках траектории движения лопастей 1, создающих момент вращения в выбранном направлении). В зонах переключения  $4$  ( $\Delta$  градусов) необходимо для сохранения направления вращения (знака момента) разворачивать лопасти 1 на  $180$  градусов, по рис. 2.

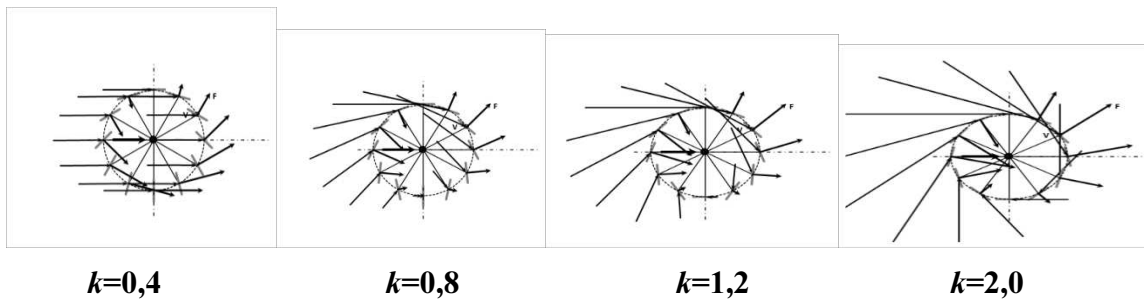


Рис. 1. Распределенная схема оптимальной ориентации лопастей.  
 Идеальная лопасть:  $s_2 = 0$ ;  $s_3 = 0$ .

Разработана вертикально-осевая ветротурбина [6], реализующая работу ВОВ в 4-х квадрантах по (рис. 3). Эта ВОВ имеет махи из лопастей, которые закреплены в виде нескольких не пересекающихся равных хорд. На верхнем и нижнем дисках, жестко закрепленных на основном валу ВОВ, причем радиусы, проведенные от основного вала через середины этих хорд, образуют между собой равные углы  $\alpha = 2\pi/k$ , где  $k$  – количество хорд на дисках.

Получаем непрерывный вращающий момент в 4-х квадрантах.

Семейство характеристик, определяющих текущие значения отбора энергии ВП за оборот ВОВ (рис. 6), располагается между представленными выше предельными конфигурациями. Зависимость этих характеристик от окружной скорости турбины  $k$  носит выраженный асимптотический характер. В частности, начальное значение коэффициента отбора энергии за полный оборот ВОВ ( $\alpha=2\pi$ ) при  $k \rightarrow 0$  составляет,  $a_0 = 1/2$ , а циклическая энергия, извлеченная ВОВ из ВП –  $A_0 = \pi F_0 L$ . В пределе же, при  $k \rightarrow \infty$ , отбор циклической энергии асимптотически стремится к значению,  $a_\infty = 1/8$  (кривая 1 на рис. 5.)

Поскольку средний за оборот ВОВ момент сил ВП равен отношению работы этих сил  $A_0$  к углу поворота  $2\pi$ , а масштабом силового момента является величина  $F_0 L$ , коэффициент отбора энергии ВП  $a$  одновременно имеет смысл удельного (безразмерного) усредненного за оборот момента силы воздействия его на лопасть ВОВ (рис. 4).

Таким образом, с ростом параметра окружной скорости, приложенный вращающий момент от поперечного лобового действия ВП стабилизируется на уровне отбора 12,5 % энергии. Поскольку отбор мощности

пропорционален отбору энергии ( $n=ka$ ), одновременно со стабилизацией момента наблюдается линейный рост отбора циклической мощности (кривая 2 на рис. 5), то есть, с ростом окружной скорости ВОВ происходит существенное повышение ее энергоэффективности.

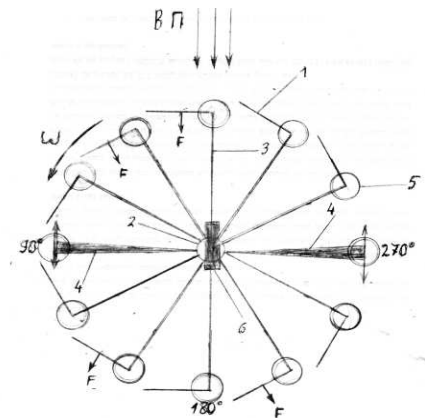


Рис. 2. Гипотетическая ВОВ:  
 1 – лопасти; 2 – вал КВ; 3 – штанги;  
 4 – зоны переключения; 5 – электропривод с датчиком положения; 6 – узел управления

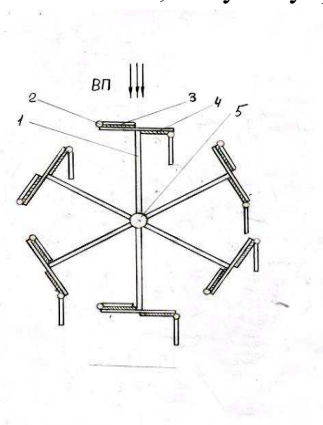


Рис. 3. Карусельное ветроколесо:  
 1 – Т-образная штанга; 2 – оси лопастей;  
 3 – лопасти; 4 – ограничители-демпферы;  
 5 – вал

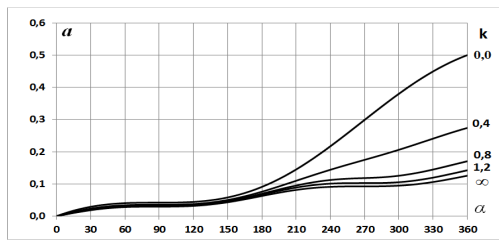


Рис. 4. Текущие накопленные значения коэффициента отбора энергии ВП за оборот ВОВ. Идеальная лопасть. Значения параметра окружной скорости  $k=0 \div \infty$ .

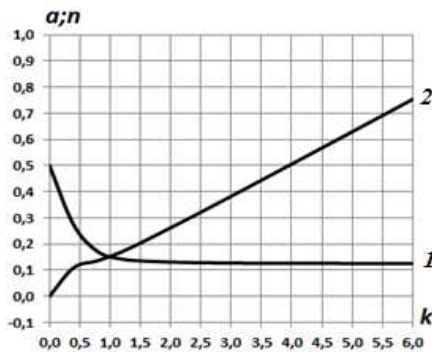


Рис. 5. Влияние окружной скорости ВОВ на циклический силовой момент и отбор энергии  $a_0$  (кривая 1) и отбор мощности  $n_0$  (кривая 2) ВП. Идеальная лопасть

### Применение крыльчатых лопастей

Технический результат применения регулируемых крыльчатых лопастей заключается в существенном повышении эффективности преобразования кинетической энергии ВП. Разработаны способ и устройство [4], позволяющие менять аэродинамическую форму крыла в процессе его кругового движения вместе с ветротурбиной. Крыло трехслойное (рис. 6).

Основу его составляет базовый лист, к которому по переднему и заднему краям на шарнирах крепится двусторонняя подвижная фигурная аэродинамическая обшивка (АО). Причем, аэродинамическая форма крыла изменяется скачком симметрично относительно базового листа при движении каждого крыла по круговой орбите в зоне изменения знака момента, формируемого крылом по (рис. 7) в пределах движения по круговой орбите относительно результирующего вектора ВП. Конструкция предполагает возможность как симметричного скачкообразного изменения формы крыла с помощью электромеханического триггера 15 по (рис. 6), так и непрерывное изменение аэродина-

мического контура с помощью закрылка 9, поворачивающегося вокруг оси 21. Силовой момент, формируемый крылом, осуществляет давление на ось лопасти в рабочем направлении вращения ВОВ. Осуществляется автоматическая подстройка угла атаки крыла относительно ВП на максимальный сигнал датчика давления, установленного на оси лопасти.

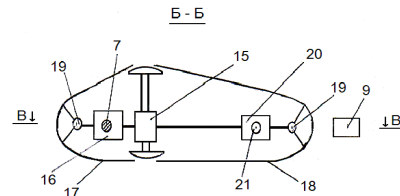


Рис. 6. Сечение крыла перпендикулярно его оси: 15 – эл. триггер; 16 – узел положения оси крыла, 17 – передняя АО; 18 – задняя АО; 19 – оси АО; 20 – узел управления закрылком; 21 – ось закрылка

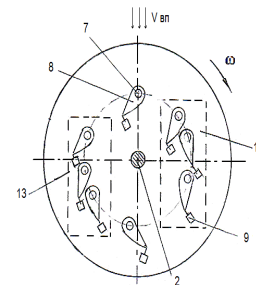


Рис. 7. Зоны переключения формы крыла: 2 – вал; 7 – ось крыла; 8 – крыло; 9 – закрылок; 13 – зона изменения момента крыла

Этот сигнал корректирует экстремальный регулятор на базе контроллера, который находится в узле управления закрылком (УУЗ) 20 и через ось 21 вращает закрылок с помощью серводвигателя, обеспечивая максимальное давление на ось лопасти.

При движении лопасти по круговой траектории в зонах инверсии формируется тормозной момент, противодействующий рабочему направлению движения турбины. При смещении крыла в зонах изменения знака момента 13 ВОВ переходит в режим торможения и происходит замыкание конечного выключателя реверса. Срабатывает триггер 15, скачкообразно изменяя аэродинамическую форму крыла на симметричную. Использование закрылков позволяет осуществлять регулирование ВОВ универсальным образом, как плавным поворотом закрылка, так и скачкообразным «перебросом» формы крыла. При наличии датчика оборотов вала, можно обеспечить управление уг-

лами атаки всех крыльев от регуляторов датчика давления одного контрольного крыла за счет вычисления запаздывания остальных крыльев по отношению к контрольному крылу, на траектории движения по кругу, с помощью контроллера. Команды управления с вычисляемым запаздыванием подаются на приводы закрылков соответствующих крыльев. Это упрощает систему управления турбиной, повышает ее надежность, упрощает конструкцию и уменьшает стоимость.

**Заключение.** Результаты исследования показали, что при изучении проблем энергоэффективности ВОВ использование в качестве объекта исследования ветротурбины с регулируемыми плосковыпуклыми лопастями позволяет сформировать универсальную оптимизационную модель, описывающую поведение ВОВ в широком спектре конструктивных и режимных параметров.

Полученные расчетные методики дают возможность исследовать энергоэффективность, как аналитическими методами, так и путем проведения численных экспериментов. Наличие продольного сопротивления воздуха в рабочих органах ВОВ существенно ограничивает возможности применения плоских лопастей. Такие турбины [9 – 10] способны работать только при низких окружных скоростях и отбирать не более одной пятой доли мощности ВП.

Существенно эффективнее оказываются крыльчатые лопасти, действующие на принципе суперпозиции сил лобового сопротивления и подъемной силы. Они способны функционировать при окружных скоростях, многократно превышающих скорости ВП, и обеспечивать отбор до половины и более мощности ВП

#### Список использованной литературы

1. Зырянов В. М., Математическая модель взаимодействия управляемой лопастью ветротурбины с воздушным потоком / В. М. Зырянов, Л. Г. Лимонов, В. М. Роткин, Ю. Б. Соколовский // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К. : – 2016. Наука и техника. – № 23 (99). – С. 21 – 28.

2. Соколовский Ю. Б. Современные ветроэнергетические установки (обзор) / Ю. Б. Соколовский, А. Ю. Соколовский. // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Том 2. – № 4. – С. 27 – 37.

3. Роткин В. М. Оптимизационная математическая модель энергоэффективности скоростной ветроэнергетической установки с плоскими лопастями / В. М. Роткин, Ю. Б. Соколовский // *Вестник Дома ученых Хайфы*. – Хайфа : – 2015. – Том XXXV.

4. Гуревич В. А. Способ преобразования кинетической энергии потока во вращательное движение крыла и установка для осуществления этого способа / В. А. Гуревич, Ю. Б. Соколовский, А. Ю. Соколовский, Е. А. Фролов. Заявка с положительным решением № 2014146593, F03D 3/06 от 10/03/2016.

5. Соколовский Ю. Б. Ветровая энергетическая установка / Ю. Б. Соколовский, В. А. Гуревич. Патент RU 2484296 C2 F03D 3/00 от.03.08 .2011. Бюллетень № 16.

6. Патент RU 2498109,C2,F03D 3 /00. Карусельное ветроколесо / В. А. Гуревич, Ю. Б. Соколовский – Бюллетень № 31 (опубликован 10.11.2013).

7. Каян В. П. Оптимизация рабочих характеристик полномасштабного макета ветроротора Дарье с прямыми управляемыми лопастями / В. П. Каян, А. Г. Лебедь // *Прикладна гідромеханіка*. – К. : – 2010. – Том 12. – № 4. – С. 26 – 35.

8. Патент Украины № 16097А на корисну модель, МПК F03D 3/00, F03D. Вітросилова установка / Каян В. П., Довгий С. О., Бойко П. М., Лебідь О. Г. Бюллетень № 7 (опубликован 07.06.2006).

9. Гуревич В. А. Способ преобразования кинетической энергии воздушного потока во вращательном движении плоской лопасти / В. А. Гуревич, Ю. Б. Соколовский, А. Ю. Соколовский. Заявка РФ № 2016108449 от 09.03.2016.

10. Соколовский Ю. Б, Карусельное ветроколесо / Ю. Б. Соколовский, А. Ю. Соколовский, Е. А. Фролов. Заявка РФ № 2016108479 (09.03.2016).

Получено 30.05.2016

#### Referense

1. Ziryaynov V.M., Limonov L.G., Rotkin V.M., and Sokolovski Y.B. Matematicheskaya model vzaimodeystviya upravlyayemoy lopastnoy vetroturbini s vozдушnim potokom [Mathematical Model of Interaction of a Controlled Kaplan Turbine with air Flow], (2016), Kiev, Ukraine, *Tehnika*, “*Elektrotehnicheskie I*

*Komputernie Sistemi*, No. 23 (99), pp. 21 – 28 (In Russian).

2. Sokolovski Y.B., and Sokolovski A.Y. *Sovremenie vetroenergeticheskie ustanovki (obzor)* [Modern wind Power Plants (review)], (2015), *Elektrotehnika: Setevoy Elektronnyy Nauchnyy Jurnal*, Vol. 2, No. 4, pp. 27– 37 (In Russian).

3. Rotkin V.M., and Sokolovski Y.B. *Optimizacionnaya model energoeffektivnosti skorostnoi vetroenergeticheskoi ustanovki s ploskimi lopastyami* [The Optimization Mathematical Model of Energy efficiency-speed wind Power Plant with flat Blades], (2015), *Vestnik Doma uchenih Haifi*, Vol. XXXV, Haifa, (In Russian).

4. Gurevitch V.A., Sokolovski Y.B. Sokolovski A.Y., and Frolov E.A. *Sposob preobrazovaniya kineticheskoy energii potoka vo vrashchatelnoye dviganiye krila I ustanovka dlya osushchestvleniya etogo sposoba* [Method of Converting the Kinetic Energy of the Stream into a Rotary Movement of the wing and Apparatus for Carrying out this Method], *Zayavka s pologitelnim recheniyem* No. 2014146593, F03D 3/06 ot 19.11.2014 (In Russian).

5. Sokolovskiy Y.B., and Gurevich V.A. *Vetrovaya energeticheskaya ustanovka* [Wind Power Installation], *Patent RU 2484296 C2 F03D 3/00* ot . Newsletter No.16 (03.08 .2011) (In Russian).

6. Gurevitch V.A., and Sokolovskiy Y.B. *Karuselnoye vetrokoleso* [Carousel wind Wheel] *Patent RF RU 2498109, C2, F03D 3/06*, Newsletter No.31 (10.11.2013) (In Russian).

7. Kayan V.P., and Lebed A.G. *Optimizaciya rabochih harakteristik polnomasshtabnogo maketa vetrorotora Darie s pryamimi upravlyaemimi lopastami* [Optimizing Performance Vetrorotora full layout Darrieus Straight blades Controlled.], (2010), Kiev, Ukraine, *Prikladna Gidromehanika*, Vol 12, No.4, pp.26 – 35

8. . Kayan V.P., Dovgiy S.O., Boyko, P.M., and Lebed A.G. *Vitrosilova ustanovka* [Wind Power Plant] – Patent Ukraini No. 16097A na korisnu model, MPK F03D 3/00, F03D, Newsletter No. 7 (07.06.2006) (In Russian).

9. Gurevitch V.A., Sokolovski Y.B., and Sokolovski A.Y. *Sposob preobrazovaniya kineticheskoy energii vozdušnogo potoka vo vrashchatelnom dviganiy ploskoy lopasti* [Method of Converting Kinetic Energy of air flow into Rotational Motion of the Flat Blade], *Zayavka na*

*Patent RF*, No. 2016108449 (09.3.2016) (In Russian).

10. Sokolovskiy Y.B., Sokolovski A.Y., and Frolov E.A. *Karuselnoye vetrokoleso* [Carousel wind Wheel], *Zayavka na Patent RF*, No. 2016108479, (09.3.2016) (In Russian).



### **Зырянов**

Вячеслав Михайлович, канд. техн. наук  
Новосибирского государственного  
технического ун-та.  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр.  
К.Маркса, 20.  
E-mail: [zvmmov@ngs.ru](mailto:zvmmov@ngs.ru)



### **Лимонов**

Леонид Григорьевич,  
канд. техн. наук.  
Главный специалист  
отдела ЧАО «Тяжпро-  
матоматика».  
Украина, 61072, Харьков,  
Пр. Науки, 56.  
E-mail:  
[lgl@tpa5.com.ua](mailto:lgl@tpa5.com.ua)



### **Роткин**

Владимир Михайлович,  
канд. техн. наук  
член Научного совета  
Дома ученых г. Хайфа.  
Израиль, 33301, ул.  
Юд.Ламед.Перес,20.  
E-mail: [ricentr@mail.ru](mailto:ricentr@mail.ru)



### **Соколовский**

Юлий Борисович,  
канд. техн. наук,  
член Научного совета  
Дома ученых г. Хайфа,  
Израиль, 33301, ул.  
Юд. Ламед. Перес, 20  
E-mail:  
[sokol1937y@gmail.com](mailto:sokol1937y@gmail.com)