

УДК 621.311.24

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.26

## КОМПАКТНАЯ ВЕТРОВАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С КОНЦЕНТРАТОРОМ ДЛЯ РЕГИОНОВ С МАЛОЙ ВЕТРОНАГРУЖЕННОСТЬЮ

В. И. ТКАЧЕНКО<sup>1,2</sup>, Ю. Г. КАЗАРИНОВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> ФЭФ, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, УКРАИНА

<sup>3</sup> ФТФ, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, УКРАИНА

\*email: yu.kazarinov@karazin.ua

**АННОТАЦИЯ** Компактные ветрогенераторы малой мощности (до 1 кВт) представляют интерес для индивидуальных потребителей и для мобильных применений. Типовые ветроэнергетические установки (ВЭУ), при диаметре ветроколеса порядка 3 метров, имеют мощность 1 кВт при скорости ветра 10 м/с. Однако для большей части территории Украины средняя скорость ветра не превышает 5 м/с и мощность таких ВЭУ составит всего 120 Вт. Предлагаемая конструкция ВЭУ в виде турбины, установленной в обтекатель, позволяет даже при средней скорости ветра получить большую эффективность и безопасность по сравнению с «классическими» ВЭУ. Кроме того, малый вес, закрытая конструкция и относительно небольшие поперечные габариты позволяют использовать аэродинамические системы для подъема ВЭУ на необходимую высоту вместо стационарных и дорогостоящих опор.

**Ключевые слова:** концентратор воздушного потока; турбина; моделирование.

## COMPACT WIND TURBINE WITH AN AIR FLOW CONCENTRATOR FOR REGIONS OF LOW SPEED WIND

V. TKACHENKO<sup>1,2</sup>, YU. KAZARINOV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology" NASU, Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, UKRAINE

<sup>3</sup> School of Physics and Technology, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Compact low-power wind turbines (up to 1 kW) are of interest for individual consumers and for mobile applications. Typical wind power plants (wind turbines) with a wind turbine diameter of about 3 meters have a power of about 1 kW at a wind speed of 10 m/s. However, for most of Ukraine, the average wind speed does not exceed 5 m/s and the power of such wind turbines will be only 120 W. The proposed design of the wind turbine in the form of a turbine installed in the concentrator of air flow allows even with an average wind speed to obtain greater efficiency and safety in comparison with the "classic" wind turbines. In addition, light weight, closed construction and relatively small transverse dimensions allow the use of aerodynamic systems for lifting wind turbines instead of stationary and expensive supports. The results of the calculation of the wind turbine with the ANSYS CFX are presented and compared with the field experiments for two turbines with 20 and 5 blades. The calculations of the 5-blade turbine are in good agreement with the experiment, whereas for the 20-blade inconsistency it is caused by an incorrect estimate of the flow velocity at the inlet to the concentrator. The proposed method for analyzing the joint operation of a turbine and a generator has shown a shortage of the selected resistive load of the generator, leading to the operation of the turbine in the region of small values of tip speed ratio.

**Keywords:** wind turbine; air flow concentrator; modelling.

### Введение

Ветроэнергетика обеспечивает более 4 % мирового потребления энергии, и при сохранении современных тенденций её вклад возрастёт с 435 ГВт на 2015 год до 977 ГВт до 2030 года [1]. Промышленная выработка электроэнергии на ветровых энергетических установках (ВЭУ) возможна при средней скорости ветра более 5 м/с, тогда как на большей части территории Украины средняя скорость ветра менее 5 м/с, а для Харьковской области составляет 4,5 м/с [2]. В таких условиях, ВЭС целесообразно использовать для индивидуального или мобильного энергообеспечения. При этом для установок номинальной мощностью 1 кВт размер ВЭУ составляет 3-3,5 м. Однако для получения такой

мощности требуется ветер со скоростью 10 м/с, что наблюдается в приземных слоях довольно редко

Кроме того транспортировка электроэнергии конечным потребителям сопровождается потерями, величина которых для Харьковской области за 2009 год составила 17,5%, или половину от 1976 Гвт·ч, которые потребило население [3]. Распределение генерации с помощью ВЭС малой мощности позволят, таким образом, снизить потери энергии в сетях.

Повышение эффективности осветительных и других электроприборов снижают общее потребление электричества и увеличивают интерес к маломощным генераторам, особенно в удаленных и горных районах [4].

Использование концентраторов различных видов позволяет решить несколько проблем, присущих традиционным ВЭУ:

- уменьшить габариты;
- снизить шум лопастей;
- понизить концевые потери.

Однако для получения значительной мощности в таких системах необходимо иметь поток воздуха соответствующих параметров. Кроме увеличения ометаемой площади можно увеличить снимаемую мощность, используя подъём ВЭУ на высоту более 100 метров, где скорость ветра в 2÷2,5 раза выше, чем у поверхности земли. Такой подъем можно осуществить, например, с помощью парашютных систем [5] или аэростатов [6].

Целью данной работы является создание численной модели экспериментальной ВЭУ с концентратором воздушного потока, и сравнение результатов моделирования с экспериментом для определения оптимального режима работы турбины, а также возможности моделирования и построения ВЭУ исследуемого типа мощностью до 300 Вт.

### Эксперимент

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена ВЭУ, состоящая из обтекателя с турбиной и электрогенератором, расположенными внутри обтекателя как показано на Рис. 1. Внутренний профиль обтекателя имеет форму гиперboloида, с минимальным диаметром 18,5 см. Закрепленный на поворотных токоcъёмниках с рулевой пластиной для ориентирования по направлению ветра обтекатель установлен на крыше здания высотой 35 м.

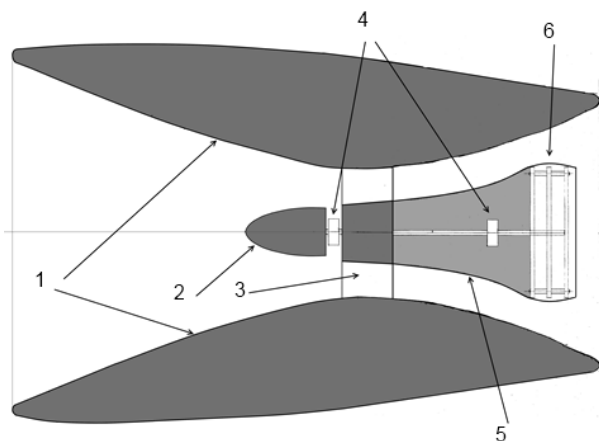


Рис. 1 – Схема ВЭУ и расположение узлов: 1 – концентратор (конфузор); 2 – носовой обтекатель; 3 – турбина; 4 – подшипники турбины; 5 – обтекатель генератора; 6 – генератор

Измерение скорости ветра осуществлялась чашечным анемометром метеостанции «WS-1600», а данные о скорости ветра и электрических параметрах

генератора записывались в виде текстового файла в IBM – PC с использованием АЦП типа «преобразователь напряжение частота» и собственного ПО.

Эксперименты проводились с двумя турбинами, имеющими 20 и 5 лопастей. В обоих случаях турбина непосредственно вращала самодельный генератор постоянного тока с диодным многофазным выпрямителем на постоянных NdFeB магнитах и катушках без сердечников [7]. Частота вращения ротора не превышала 900 об/мин. В качестве нагрузки использовались резисторы сопротивлением от 75 до 235 Ом.

Напряжение на нагрузке зависит от частоты вращения ротора следующим образом:

$$U = \frac{4\pi \cdot f \cdot N \cdot n \cdot \Phi - 2U_d}{1 + 2(R + 2\pi \cdot f \cdot N \cdot L) / R_L} = \frac{3.35 \cdot f - 1.31}{1 + (6.7 + 0.144 \cdot f) / R_L} \quad (1)$$

где  $f$  – частота вращения ротора в Гц,  $N$  – число полюсов магнитной системы ротора,  $L$  – индуктивность обмотки,  $\Phi$  – модуль магнитного потока,  $U_d$  – падение напряжения на диодах выпрямителя,  $R$  – сопротивление обмотки,  $R_L$  – сопротивление нагрузки. Численные значения в выражении (1) получены из анализа экспериментальных зависимостей, полученных при стендовых испытаниях генератора.

### Моделирование

Моделирование работы ВЭУ выполнялось с использованием программных комплексов FlowER [8] и ANSYS CFX [9]. В обоих случаях протекание воздуха снаружи обтекателя не рассчитывалось. Выбор типа расчётной сетки и разбиения в ANSYS выполнялся автоматически, в FlowER использовалась сетка типа H и проточная часть разбивалась на три участка до лопаток, лопатки и после лопаток. Это позволило избежать перекручивания сетки из-за большой длины проточной части и отсутствия вала на входе ВЭУ. Рассчитывалось вязкое турбулентное течение. В качестве параметров задавалась частота вращения ротора, и скорость потока на входе для ANSYS и перепад давления между входом и выходом для FlowER. Расчётная величина в обоих случаях – мощность на валу. Также контролировалось распределение давления по поверхности лопастей.

Результаты моделирования исходной турбины с 20 лопатками с помощью FlowER показало, что в лопатках используется только узкая область вблизи входной кромки. Исходя из этого, для повышения эффективности можно сократить число лопастей или уменьшить ширину лопасти. Поскольку для узких лопастей возрастают требования механической

прочности используемых материалов, был выбран вариант сокращения числа лопастей.

Построение зависимостей мощности от частоты вращения ротора при постоянной скорости потока на основе расчётов FlowER затруднительно, поэтому эти зависимости были получены с использованием пакета ANSYS. Полученные значения для 5 значений скорости потока показаны на Рис. 2. Мощность ВЭУ с данной турбиной слишком мала для практического применения, что связано с уже упомянутой незагруженностью лопастей, а также формированием вихревых обратных потоков в конфузоре из-за чрезмерного сопротивления турбины потоку воздуха.

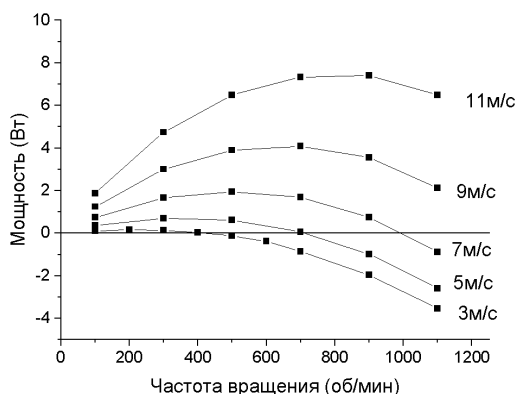


Рис. 2 – Зависимость мощности турбины (20 лопастей) от частоты вращения для различных скоростей потока на входе ВЭУ

### Оптимизация

Оптимизация турбины была выполнена в ANSYS в два этапа. На первом этапе было выбрано число лопастей равное 5. На такой выбор повлияли два фактора:

1. частота вращения турбины ограничена генератором на уровне 900-1000 об/мин;
2. длина хорды лопатки у места ее крепления порядка 3 см, для обеспечения достаточной прочности изготовленных из стеклопластика лопастей.

На втором этапе в пакетном режиме был выполнен перебор углов наклона передней и задней кромок лопатки, что однозначно определяет ее форму и углы атаки. Для полученной таким образом лопатки был выполнен расчёт зависимости мощности от частоты вращения при различных скоростях потока, которые имеют аналогичный представленным на Рис. 2. вид.

Полученные выше оба набора зависимостей мощности от частоты вращения были пересчитаны в зависимости эффективности ВЭУ от быстроходности турбины (см. Рис.3.).

Тот факт, что все значения эффективности ВЭУ от быстроходности турбины укладываются на однотипные гладкие кривые, указывает на

соответствие расчётных значений общей закономерности. Анализ кривых показывает, что оптимизация турбины привела к повышению эффективности, и существенному расширению диапазона максимальной эффективности.

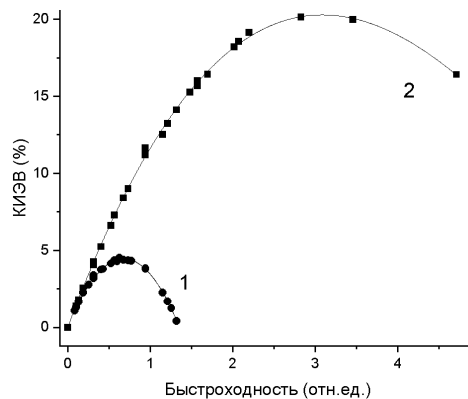


Рис. 3 – Зависимость эффективности ВЭУ от быстроходности турбины: 1 – 20 лопастей, 2 – 5 лопастей

Экспериментальные результаты работы ВЭУ показаны маркерами на Рис. 4 для турбин с 20 (круги) и 5 (треугольники) лопатками. Из рисунка видно, что замена турбины на оптимизированную привела к существенному увеличению эффективности ВЭУ.

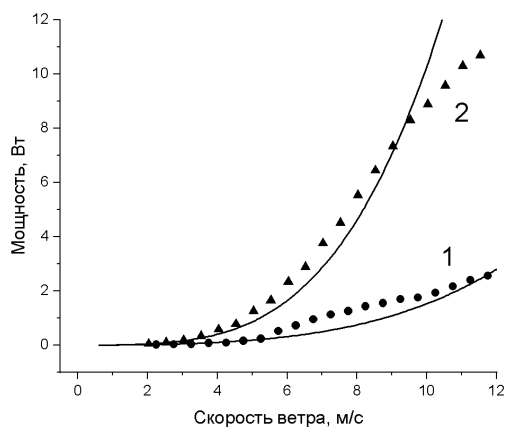


Рис. 4 – Зависимость мощности ВЭУ при резистивной нагрузке генератора с использованием исходной (1) и оптимизированной турбины (2). Точки – эксперимент, линии – расчет

Однако, сравнение зависимостей на Рис. 4 с расчётными зависимостями на Рис.2 или Рис. 3 некорректно. Это связано с тем, что в эксперименте турбина была нагружена генератором с выходной характеристикой описываемой выражением (1). В свою очередь, генератор был нагружен заданной омической нагрузкой и, соответственно, при заданной скорости ветра частота вращения турбины будет увеличиваться до тех пор, пока её мощность не

сравняется с мощностью генератора. Построение расчётных зависимостей мощности от скорости потока, показанные на Рис. 4 линиями, было выполнено следующим образом: зависимости КИЭВ от быстроходности на Рис. 3. были аппроксимированы полиномами 3-ей степени (тонкие линии на Рис. 3). После такой аппроксимации численно решалось уравнение относительно частоты вращения ротора:

$$\frac{(4\pi f N n \Phi - 2U_d)^2}{R_L + 2(R + 2\pi f N L)} = (az^3 + bz^2 + cz) \cdot \frac{\rho S v^3}{2}, \quad (2)$$

где  $z = \pi D f / v$  — быстроходность;  $a, b, c$  — коэффициенты аппроксимирующего полинома;  $\rho$  — плотность воздуха;  $S$  — площадь входного окна ВЭУ;  $v$  — скорость потока,  $f$  — частота вращения ротора.

Из полученных значений частоты вращения с использованием выражения (1) определены значения мощности на нагрузке в зависимости от скорости потока. Как видно из Рис. 4, согласие расчётов с экспериментом достаточно хорошее, что позволяет использовать полученные результаты для дальнейшей оптимизации рассмотренной ВЭУ и последующего моделирования ВЭУ мощностью 300 — 1000 Вт.

Пересчёт экспериментальных зависимостей мощности от скорости потока в координаты КИЭВ — быстроходность, показал, что обе турбины при использовании резистивной нагрузки в 150 Ом для данного генератора работали в режиме малой быстроходности, не соответствующей оптимальной эффективности. Для 5-и лопастной турбины максимальный КИЭВ в 20% достигается при  $z=3,1$  тогда как реальная быстроходность не превышала 0,66. При этом КИЭВ составляет всего 8%. При оптимальных условиях работы турбины по быстроходности частота вращения ротора определяется выражением  $f = 5.45 \cdot v$ . Однако уже при скорости ветра 3 м/с оптимальная частота превышает максимально допустимую частоту вращения генератора.

Как следует из вышеизложенного, данный подход моделирования и оптимизации ВЭУ позволяет определить нагрузочную характеристику, реализующую оптимальные условия. Например, используя уравнение (2) зафиксируем значение  $z=3.084$ , выразив скорость ветра через частоту вращения ротора. После подстановки максимального значения КИЭВ=0.203, решим это уравнение и получим зависимость сопротивления нагрузки от частоты. При частоте вращения более 5 об/с сопротивление нагрузки в килоомах обратно пропорционально частоте (или напряжению):  $R_L = 63/f = 19/U$ . Описанный режим нагрузки пригоден только для систем с постоянной геометрией, однако он значительно проще в реализации, чем поиск максимума, предложенный в работе [10]. ВЭУ с переменным углом атаки лопаток и управлением потоком как снаружи ВЭУ, так и внутри имеют

потенциально более высокий КИЭВ, но при равных габаритах имеют большую массу и расходуют часть вырабатываемой энергии для управления [11].

## Выводы

Хорошее совпадение экспериментальных данных и результатов моделирования с использованием программных пакетов FlowER и ANSYS показало их применимость для моделирования работы малых ВЭУ с концентратором воздушного потока.

На основе расчетов в программных пакетах FlowER и ANSYS построены графики зависимостей мощности ВЭУ от частоты вращения при различной резистивной нагрузке генератора от скорости потока воздуха. Построены зависимости эффективности ВЭУ от быстроходности турбин.

Предложенный способ нагружения электрического генератора позволяет реализовать максимальную эффективность турбины.

## Список литературы

1. **Ayuso, M.** World Energy Resources Wind | 2016 / **M. Ayuso, C. Kjaer** // *World Energy Council*. – 2016. – 70 р.
2. **Кудря, С. О.** Атлас энергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / **С. О. Кудря, В. Ф. Резцов, Т. В. Суржик та ін.** – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – 2008. – 55 с.
3. **Малыренко, В. А.** Відновлювані джерела енергії для Харківської області: сучасний стан, тенденції, перспективи / **В. А. Малыренко, І. К. Алетич, Ю. І. Вергелес** // *Енергосбереження, енергетика, енергоаудит*. – 2012. – № 7 (101). – С. 36–43.
4. **Lew, D. J.** Alternatives to coal and candles: Wind power in China / **D. J. Lew** // *Energy Policy*. – 2000. – Vol. 28. – № 4. – P. 271–286. – doi: 10.1016/S0301-4215(99)00077-4.
5. **Лапшин, Ю. С.** Безбашенная ветроэнергетическая установка / **Ю. С. Лапшин, С. А. Ардашов** // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. – 2013. – № 80. – С. 50–53.
6. **Рогов, В. Ю.** Оценка эффективности развития аэростатной ветроэнергетики в континентальных районах / **В. Ю. Рогов** // *ВЕСТНИК ИрГТУ*. – 2013. – №75. – С. 204–209.
7. **Ткаченко, В. І.** Електрогенератор постійного струму / **В. І. Ткаченко, Ю. Г. Казарінов, О. В. Москвітін, О. М. Шахова** // *Патент України на корисну модель UA88420*. – 2014.
8. **Yershov, S.** Numerical method and code FlowER for calculation of 3d viscous unsteady flows within axial and radial turbomachines / **S. Yershov, A.V. Rusanov** // *Zesz Nauk Ciepł Masz Przepływowe - Turbomach / Politech Łódzka*. – 1999. – №115. – P. 479–88.
9. **Jureczko, M.** Optimisation of wind turbine blades / **M. Jureczko, M. Pawlak, A. Mężyk** // *J Mater Process Technol*. – 2005. – Vol. 167. – №2-3. – P. 463–71. – doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2005.06.055.
10. **Wang, Q.** An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems / **Q. Wang, L. Chang** // *Power Electron IEEE*



*Trans.* – 2004. – Vol. 19. – №5. – P. 1242-1249. – doi: 10.1109/TPEL.2004.833459.

11. **Лебедь, В. Г.** Метод аэродинамического расчета ветроэнергетической установки с концентратором воздушного потока / **В. Г. Лебедь, С. А. Калкаманов** // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2012. – №5 (92). – С. 31-42.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Ayuso, M.** World Energy Resources Wind | 2016. *World Energy Council*, 2016, 70 p.
2. **Kudrya, S. O.** Atlas energetychnogo potencialu vidnovlyuvanyh ta netradycyjnyh dzherel energy Ukrainy. Kyiv.: Institute of renewable energetics NAS of Ukraine, 2008, 55 p.
3. **Malyarenko, V. A.** Vidnovlyuvani dzherela energy dly Kharkivs'koyi oblasti: suchasnyj stan, tendencyi, perspektivy. *Energoberezhenie energetika energoaudit*, 2012, 7 (101), 36-43.
4. **Lew, D. J.** Alternatives to coal and candles: Wind power in China. *Energy Policy*, 2000, 28(4), 271-286, doi: 10.1016/S0301-4215(99)00077-4.

5. **Lapshin, Yu. S.** Bezbashennaya vetroenergeticheskaya ustanovka. *Visnyk KrNU imeni Myhajla Ostrograds'kogo*, 2013, 80, 50-53.
6. **Rogov, V. Yu.** Ocenka effektivnosti razvitiya aerostatnoj vetroenergetiki v kontinental'nyh rajonah. *Vestik IrGTU*, 2013, 75, 204-209.
7. **Tkachenko, V. I.** Electrogenerator postijnogo strumu. *Patent of Ukraine on the utility model UA88420*, 2014.
8. **Yershov, S.** Numerical method and code FlowER for calculation of 3d viscous unsteady flows within axial and radial turbomachines. *Zesz Nauk Ciepl Masz Przeplywowe - Turbomach / Politech Łódzka*, 1999, 115, 479-88.
9. **Jureczko, M.** Optimisation of wind turbine blades. *J Mater Process Technol*, 2005, 167(2-3), 463-71, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2005.06.055.
10. **Wang, Q.** An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems. *Power Electron IEEE Trans*, 2004, 19(5), 1242-1249, doi: 10.1109/TPEL.2004.833459.
11. **Lebed, V. G.** Metod aerodynamicheskogo rascheta vetroenergeticheskoy ustanovki s koncentratorem vozdušnogo potoka. *Aviatsionno-kosmicheskaja tekhnika i tekhnologija*, 2012, 5 (92), 31-42.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Ткаченко Виктор Иванович** – доктор физ.-мат наук, профессор, директор НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт»; Физико-энергетический факультет, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, зав. кафедрой Нетрадиционных энерготехнологий и экологии, г. Харьков, Украина; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

**Viktor Tkachenko** – Doctor of Science, Professor, Director of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; Head of the Department of Physics of Innovation Energy and Technology and Ecology, School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

**Казаринов Юрий Геннадиевич** – кандидат физ.-мат. наук, НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт», научный сотрудник; Физико-технический факультет, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, научный сотрудник кафедры прикладной физики и физики плазмы, г. Харьков, Украина; e-mail: yu.kazarinov@karazin.ua.

**Yuri Kazarinov** – Candidate of Physics and Mathematics Sciences (Ph. D.), researcher of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; researcher at Department of Applied Physics and Plasma Physics, School of Physics and Technology, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: yu.kazarinov@karazin.ua.

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Ткаченко, В. И.** Компактная ветровая энергетическая установка с концентратором для регионов с малой ветронагруженностью / **В. И. Ткаченко, Ю. Г. Казаринов** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 11-15. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.26.

*Please cite this article as:*

**Tkachenko, V., Kazarinov, Yu.** Compact wind turbine with an air flow concentrator for regions of low speed wind. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 26 (1302), 2, 11-15, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.26.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Ткаченко, В. І.** Компактна вітрова енергетична установка з концентратором для регіонів з низьким вітровим потенціалом / **В. І. Ткаченко, Ю. Г. Казарінов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 11-15. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.26.

**АНОТАЦІЯ** Компактні вітрові генератори малої потужності (до 1 кВт) становлять інтерес для індивідуальних споживачів і для мобільних застосувань. Типові вітрові енергетичні установки (ВЕУ), при діаметрі вітроколеса близько 3 метрів, мають потужність 1 кВт за швидкості вітру 10 м/с. Однак для більшої частини території України середня швидкість вітру не перевищує 5 м/с і потужність таких ВЕУ складає лише 120 Вт. Пропонована конструкція ВЕУ у вигляді турбіни, встановленої в обтічник, дозволяє навіть при середній швидкості вітру отримати більшу ефективність і безпеку в порівнянні з «класичними» ВЕУ. Крім того, мала вага, закрита конструкція і відносно невеликі поперечні габарити дозволяють використовувати аеродинамічні системи для підйому ВЕУ на необхідну висоту замість стаціонарних і дорожніх опор.

**Ключові слова:** концентратор повітряного потоку; турбіна; моделювання.

*Поступила (received) 20.06.2018*