

3. Jakushokas, R. Power Network Optimization Based on Link Breaking Methodology [Text] / R. Jakushokas, E. G. Friedman // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2013. – Vol. 21, Issue 5. – P. 983–987. doi:10.1109/tvlsi.2012.2201186
4. Холмский, В. Г. Оптимизация потокораспределения в замкнутых электрических сетях с высокой степенью неоднородности [Текст] / В. Г. Холмский // Электричество. – 1965. – № 9. – С. 16–21.
5. Лежнюк, П. Д. Моделивання впливу неоднорідності електричної системи на оптимальність її режиму [Текст] / П. Д. Лежнюк, Д. І. Оболонський, Л. Р. Пауткіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1996. – № 4. – С. 44–49.
6. Лежнюк, П. Д. Моделирование компенсации влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Д. І. Оболонський // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 2–8.
7. Веников, В. А. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока [Текст] / В. А. Веников, Ю. П. Рыжов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
8. Кулик, В. В. Комбіновані моделі нормальних режимів електричних систем з урахуванням особливостей довгих ліній електропередачі [Електронний ресурс] / В. В. Кулик, С. Я. Вишневський // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – №1. – Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012\\_1/2012-1.files/uk/12vvkltl\\_ua.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012_1/2012-1.files/uk/12vvkltl_ua.pdf).
9. Сулейманов, В. М. Электричні мережі та системи [Текст] / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – К.: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2008. – 504 с.
10. Лежнюк, П. Д. Реалізація контролю і керування функціонуванням трансформаторів в електроенергетичних системах [Текст] / П. Д. Лежнюк, К. І. Кравцов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 84 – 86. – ISSN 1997-9274.

*Розглянуто рішення проблеми нестабільних параметрів вихідної напруги вітроелектростанцій через непостійність вітрового потоку, які обмежують область їх використання, на основі переходу до розробки пневмоелектростанцій, яка містить у своїй структурі акумулятори енергії у вигляді ємностей стисненого повітря високого тиску. Запропонована конкретна розробка пневмоелектростанції малої потужності. Пророблене питання розрахунку та вибору розмірів акумуляторів енергії у вигляді ємностей високого тиску, з урахуванням наявності визначених інтервалів вітрового потоку*

**Ключові слова:** вітроелектростанція, пневмоелектростанція, акумулятор енергії, стиснене повітря, тиск, потужність, ємність, електроенергія

*Рассмотрено решение проблемы нестабильных параметров выходного напряжения ветроэлектростанций из-за непостоянства ветрового потока, ограничивающих область их применения, на основе перехода к разработке пневмоэлектростанции, содержащей в своей структуре аккумуляторы энергии в виде емкостей сжатого воздуха высокого давления. Предложена конкретная разработка пневмоэлектростанции малой мощности. Проработан вопрос расчета и выбора размеров аккумуляторов энергии в виде емкостей высокого давления, с учетом наличия определенных интервалов ветрового потока*

**Ключевые слова:** ветроэлектростанция, пневмоэлектростанция, аккумулятор энергии, сжатый воздух, давление, мощность, скорость, время, емкость, электроэнергия

УДК 621.311

## ПНЕВМОЭЛЕКТРО- СТАНЦИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ БЫТОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**В. О. Квашнин**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра "Электромеханические  
системы автоматизации"

Донбасская государственная  
машиностроительная академия  
ул. Шакинова, 72, г. Краматорск,  
Донецкая обл., Украина, 84313  
E-mail: v.kvashnin@mail.ru

**В. В. Квашнин**

Кафедра физики неравновесных процессов,  
метрологии и экологии  
Донецкий национальный университет  
пр. Гурова, 14, г. Донецк, Украина, 83001  
E-mail: Vladyslav\_VK@i.ua

### 1. Введение

Во всех индустриально развитых странах, особенно там, где относительно мало собственных углеводородов, альтернативные технологии получения

электроэнергии имеют стратегическое значение для развития как промышленности, так и макроэкономики в целом [1].

Одним из наиболее перспективных направлений альтернативной энергетики является ветроэнергети-

ка. Это направление динамично развивается во многих странах мира. Появляются новые установки и комплексы наземного базирования, а также морские (оффшорные) ветроэлектростанции [2].

На сегодняшний день доля ветроэнергетики в мировом энергопроизводстве составляет 1%, причем в некоторых странах на долю энергии выработанной за счет ветра, приходится 20% и более от общего объема энергопоставок. Так, в США установлено более 1,5 млн. кВт мощностей ВЭУ, в Дании ВЭУ производят около 3% потребляемой страной энергии. Велика установленная мощность ВЭУ в Швеции, Нидерландах, Великобритании и Германии [3].

Согласно скорректированной «Энергетической стратегии Украины на период до 2030 г.» в нашей стране в 2030 г. должно вырабатываться не менее 30% от всей электроэнергии из возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнце, ветер, воды рек и др. [4]. При этом установленная мощность отечественных ВЭС только за 2012 год выросла за 2011 г. почти вдвое – до 301,8 МВт против 151,1 МВт на конец 2011 г.

Согласно расчетам Украинской ветроэнергетической ассоциации (УВЭА), установленная мощность национальной ветроэнергетики к концу 2015 г. может достигнуть 4000 МВт, а к концу 2020 г. – 5600 МВт [1].

На основании выше изложенного можно сделать вывод, что вопросы поиска и перехода на альтернативные экологически чистые и возобновляемые источники энергоресурсов во всем мире являются актуальными и тем более для Украины, особенно в настоящее время.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) являются одним из альтернативных источников, способных преобразовывать энергию свободного ветра в энергию пригодную для нужд человека и различных видов его деятельности. Однако, они пока что не находят своего широкого распространения из-за нестабильности параметров вырабатываемой таким способом полезной энергии. В связи с этим возникает потребность в разработке различных проектов ветроэнергетической станции (ВЭС), в которых указанный недостаток сведен до минимума, либо вообще может быть исключен, и которые будут наделены широким спектром потребительских свойств, что позволит найти им свое широкое применение в народном хозяйстве. Применительно к нашим условиям, ВЭС должны быть просты, надежны и относительно недороги. Подобным примером может служить разработка ВЭС мощностью до 4 кВт.

Структурная схема ВЭС определяется видом используемого аккумулятора энергии (АЭ) и способом питания нагрузки.

Выбор способа аккумуляции связан со многими проблемами, основной из которых является КПД хранилищ. Каждое преобразование одного вида энергии в другой связан с какими-то потерями и в случае аккумулирующих установок – эти потери должны быть минимальны [5, 6].

Для ВЭС небольшой установленной мощности наиболее подходящим аккумулятором энергии (АЭ) явля-

ется пневмоаккумулятор, работающий на сжатом воздухе. Подобный аккумулятор АЭ из числа известных и доступных АЭ – химических, тепловых, механических обладает определенным набором преимуществ.

Именно данный тип АЭ позволяет одновременно сочетать в себе:

- конструктивную простоту;
- высокую энергоемкость при определенных условиях – высоком давлении сжатого воздуха;
- способность сохранять накопленную энергию неопределенно долгое время без существенных потерь.

В этом случае ВЭС преобразуется в пневмоэлектростанцию (ПЭС), в которой выработка электроэнергии осуществляется генератором (Г), приводимым во вращение декомпрессорной установкой (Д), работающей на сжатом воздухе [7, 8]. Структурная схема такой ПЭС имеет вид, приведенный на рис. 1.

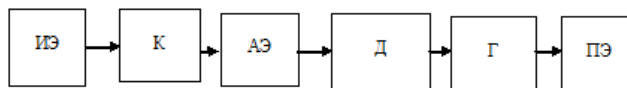


Рис. 1 – Структурная схема ПЭС

На схеме (рис. 1) обозначено: ИЭ – источник энергии (ВЭУ); К – компрессор; АЭ – аккумулятор энергии; Д – декомпрессор; Г – генератор; ПЭ – потребитель электроэнергии.

## 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка ветроэнергетической установки, у которой по-возможности должны быть минимизированы недостатки, характерные ВЭС – зависимость вырабатываемой электроэнергии и ее параметров от непостоянства ветровых потоков.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Изменение схемного решения ВЭС – с включением в нее накопителей энергии в виде сжатого воздуха под большим давлением и построение на основе новой структуры пневмоэлектростанции.
2. Определение условий работоспособности предлагаемой разработки.
3. Оценка ее эффективности для конкретных типов-размеров с установленной мощностью до 4 кВт.

## 4. Разработка пневмоэлектростанции мощностью до 4 кВт

Все параметры ПЭС определяются в зависимости от общей емкости выбранного АЭ. В качестве базового типоразмера АЭ принята емкость диаметром  $D=1,5$  м и высотой  $H=2$  м с рабочим объемом

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \approx 3,5 \text{ м}^3.$$

Согласно [9], потенциальная энергия  $E_{\text{г}}$ , которая может быть накоплена в данном объеме емкости, определяется по формуле:

$$E_{\text{п}} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса рабочего тела (сжатого воздуха);  $\mu$  – молярная масса воздуха ( $\mu = 2,9 \cdot 10^{-2}$  кг·моль);  $R$  – молярная газовая постоянная ( $R=8,314$  Дж/кмоль);  $T$  – температура рабочего тела (сжатого воздуха), по термодинамической шкале;  $P_1, P_2$  – начальное и конечное давление воздуха ( $P_1 > P_2$ ) при выполнении им потенциальной работы и зависит от массы сжатого воздуха, накопленного в данном объеме.

При  $P_1=80$  атм.  $= 8 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup> и  $T=250$  ( $t=-27$  °C) в объеме  $V=3,5$  м<sup>3</sup> содержание воздуха составляет:

$$m_1 = \frac{PV\mu}{RT} = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot 3,5 \cdot 2,9 \cdot 10^{-2}}{2,3 \cdot 250} \approx 390 \text{ кг.} \quad (2)$$

Тогда накопленная энергия при перепаде давления  $\frac{P_1}{P_2}=20$  составит:

$$E_{п1} = \frac{390}{2,9 \cdot 10^2} \cdot 8,3 \cdot 250 \ln \frac{80}{4} \approx 83,800 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 23,2 \text{ кВт·час.}$$

Для максимальной мощности  $P_{\max} = 4$  кВт, которую может генерировать ПЭС, возможен максимальный крутящий момент при скорости вращения  $n=60$  об/мин.

$$M_{\max} = \frac{P_{\max}}{n} \cdot 9550 = 636 \text{ Н·м.}$$

При этом для создания компрессором давления  $P_1=80$  атм., усилие  $F_k$ , развиваемое поршнем площадью  $S=0,001$  м<sup>2</sup>, должно быть не менее:

$$F_k \geq P_1 \cdot S = 80 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3} = 8 \cdot 10^3 \text{ Н.} \quad (4)$$

Для получения расчетного усилия  $F_k = 8 \cdot 10^3$  Н, необходим крутящий момент  $M_k$  на приводном валу радиусом  $r = 0,05$  м.

$$M_k = F_k \cdot r = 400 \text{ Н·м.}$$

В случае 4х цилиндрического компрессора суммарный максимальный крутящий момент

$$M_{\Sigma k} = 1,5 \cdot M_k = 600 \cdot \text{Н·м.} \quad (5)$$

Т. к.  $M_{\max} > M_{\Sigma k}$ , то 4х киловаттная мощность ВЭУ может обеспечить работу компрессора с общим объемом 4х цилиндров

$$V_{\Sigma} = 4 \cdot S \cdot h = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-1} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3, \quad (6)$$

где  $h=2 \cdot r=2 \cdot 0,05=0,1$  м – максимальный ход поршня.

При выбранных условиях работы, начальная скорость заряда  $V_n$  1-й емкости от остаточного давления  $P_{\text{ост}}=P_2=4$  атм., будет равна:

$$V_n = V_{\Sigma} \cdot \rho \cdot 60n \frac{P_1}{P_{\text{ост}}} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,29 \cdot \frac{80}{4} = 37,1 \text{ кг/час,} \quad (7)$$

где  $\rho=1,29$  кг/м<sup>3</sup> – удельная плотность воздуха при нормальных условиях.

Конечная  $V_k$  определяется из условия  $P_{\text{ост}}=P_1$ ;

$$V_k = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,29 \cdot 3,600 = 1,85 \text{ кг/час,}$$

Тогда средняя скорость заправки  $\bar{V}$  одного АЭ объемом  $V=3,5$  м<sup>3</sup> приблизительно составит:

$$\bar{V} \approx \frac{V_n + V_k}{2} \approx 19,4 \text{ кг/час,} \quad (8)$$

а время заряда  $t_3$  будет равно:

$$t_3 = \frac{m_1 + m_2}{2} \approx \frac{390 - 19}{19,4} \approx \frac{371}{19,4} \approx 19 \text{ часов,} \quad (9)$$

где  $m_2 \approx 19$  кг – масса сжатого воздуха в емкости  $V=3,5$  м<sup>3</sup> при  $P_2=4$  атм.

Мощность потребляемой нагрузки выбирается из условия создания возможности бесперебойного питания потребителя вырабатываемой электроэнергией при минимальном количестве емкостей АЭ (двух) – одной, находящейся в режиме зарядки, второй в режиме работы.

Если принять номинальную мощность потребителя электроэнергии  $P_n$  на уровне 1 кВт, то расчетное время работы одной полностью заряженной емкости составит:

$$t_p = \frac{E_{п1}}{P_n} = \frac{23,2}{1} \approx 23 \text{ часа} > t_3,$$

С учетом фактора нестабильности ветровой нагрузки количество емкостей АЭ следует увеличить. Для 3-х полностью заряженных емкостей расчетное время бесперебойного питания нагрузки  $P_n=1$  кВт в период безветрия составит:  $T_p = 3t_p = 69$  часов  $\approx 2,5$  суток.

Питание потребителя электроэнергии при более глубоком разряде с перепадом давления  $\frac{P_1}{P_2}=40$ , позволяет увеличить емкость  $E_{п\Sigma}$  полученного АЭ с

69 кВт·час до 82 кВт·час, что может обеспечить продолжительность бесперебойного питания электроэнергией потребителя с  $P_n=1$  кВт на протяжении 82 часов (более 3-х суток).

## 5. Методика определения параметров ПЭС

Выполненные расчеты проведены для ПЭС, имеющей ортогональный тип ротора с поперечным осевым сечением ометаемой фигуры [10],  $S_c = N_k \cdot d_k \approx 10$  м<sup>2</sup> и номинальной мощностью ротора  $P_n = 4$  кВт при средней скорости ветра  $\bar{U}_v \approx 15$  м/сек.

При расположении ПЭС в городской черте, где преобладают многоэтажные строения, ее место согласно [10] следует выбирать на удалении не менее (7–10) D диаметров агрегатов от заграждения сооружений.

В противном случае уже на расстоянии корпуса 7D агрегата по ширине следа происходит уменьшение дефицита потока энергии ветра в 2 раза.

В случае невозможности выполнения указанного условия, ослабление потока ветровой энергии, которое может достигать 60 % от первоначального, частично или полностью можно компенсировать применением коллинеарного ротора (с горизонтальной осью вращения) и саморазворотом по ветру, который обладает несколько большим коэффициентом использования энергии ветра ( $\approx 0,3$  против 0,15–0,22 для ВЭУ с горизонтальной осью вращения).

Ослабление ветрового потока при размещении ПЭС в городской черте может быть также учтено

увеличением диаметра ветрового колеса  $D_k$  его активной площади  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ , это позволит получать расчетную номинальную мощность ( $P_n \approx 4$  кВт) при более низких средних скоростях ветра  $\bar{U}_v$ .

Если воспользоваться зависимостью  $P_n = f(D, U_{cp})$  согласно [10]

$$\frac{P_n}{S_k} \approx -0,2 + 0,04 U_{cp}, \quad (10)$$

то, зная  $P_n = 4$  кВт и  $U_{cp} = 15$  м/сек, можно определить диаметр ветрового колеса, который будет составлять  $D_k \approx 3,6$  м. При  $U_{cp} = 6$  м/сек диаметр колеса для выработки энергии  $P_n = 4$  кВт, следует увеличить до  $D_k = 12$  м.

Примечательно, что подобные небольшие ветроустановки, которые размещены недалеко от Киева, имея диаметры колес,  $D = 15$  м развивают мощность до 20 кВт при средней скорости ветра  $U_{cp} = 8$  м/с, что хорошо согласуется с приведенным соотношением (9).

Коэффициент использования энергий ветра для этих установок равен:  $C_m = 0,36$ .

Таким образом, наиболее предпочтительным для наших местных условий при отсутствии каких-либо предварительных данных о местных ветроресурсах представляется ВЭУ с коллинеарным ротором вращения и диаметром ветроколеса:  $D = (3,6 - 12)$  м. Большинство ветрогенераторов сделаны таким образом, что начинают раскручиваться при начальном ветре 2,5–3 м/с. Выработка мощности, указанной в паспорте генератора, возможна при скоростях ветра более 8 м/с. На территории Украины не так много мест, где есть такие ветровые условия. Поэтому следует рассмотреть новые конструкции, которые способны работать в «некомфортных» для ветрогенерации условиях. Наиболее интересной является разработка действующей модели нового типа ветрогенератора, который способен начинать работу при скорости ветра менее 1 м/с. Эта разработка отмечена знаком «Зеленый Оскар». Такая конструкция позволяет иметь типоразмеры для генерации в пределах от 500 до 10000 Вт. При этом уровень шума низкий, конструкция не требует высокой мачты [11].

### 5. Анализ технической эффективности предложенной разработки

Примерный вид предлагаемой ПЭС представлен на рис. 2.

Для оценки предложенной разработки сопоставим потенциальный запас энергии, который способна выработать предлагаемая ПЭС с возможными теплопотерями при остывании воды в плавательном бассейне.

Согласно санитарным нормам для плавательных бассейнов минимальная температура воды  $t_{min1} = 24$  °С, воздуха в помещении –  $t_{min2} = 26$  °С. Так как  $t_{min1} < t_{min2}$ , то основные теплопотери имеют место на границах соприкосновения воды со стенами и дном плавательного бассейна.

Если считать, что из-за наличия теплопотерь на границах бассейна в слое воды толщиной  $h_c = 0,1$  м происходит снижение температуры воды на 5%, т.е.  $\Delta t = 0,05 t_{min1} = 1,2$  °С, то необходимое количество тепла  $\Delta \theta$  для поддержания постоянства температуры воды в нем согласно [10] составит:

$$\Delta \theta = C m \Delta t = 4180 \cdot 60000 \cdot 1,2 \approx 3,0 \cdot 10^5 \text{ кДж}, \quad (11)$$

где  $C = 4180$  Дж/кг·град – удельная теплоемкость воды при  $t_1 = 24$  °С;  $m = 60000$  кг – масса воды в слое толщиной 0,1 м по всему периметру бассейна.

Суммарный запас потенциальной энергии принятого аккумулятора энергии  $\Sigma$  при глубоком разряде составит:

$$E_{n\Sigma} = 82 \text{ кВтч} \approx 3,0 \cdot 10^5 \text{ кДж}.$$

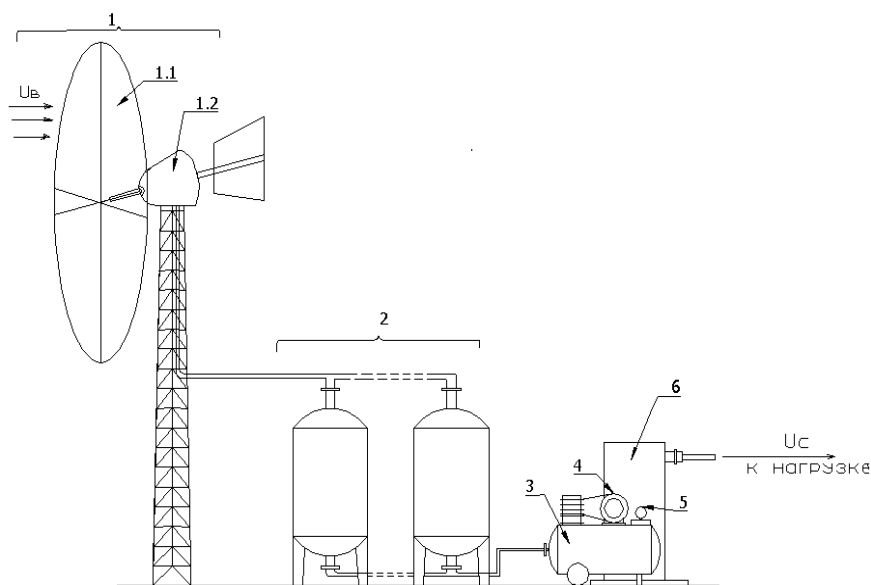


Рис. 2. Пневмоэлектростанция: 1.1 – ветроколесо; 1.2 – компрессор; 2 – АЭ; 3 – декомпрессор; 4 – генератор; 5 – манометр; 6 – блок контрольно-измерительной аппаратуры и управления

### 6. Выводы

Таким образом, в результате выполненной работы предложено и аналитически обосновано новое схемное решение ветроэнергетической установки, с переходом на использование в качестве промежуточного энергоносителя – сжатого воздуха, и построение на основе предложенной новой схемы пневмоэлектростанции.

Определены типоразмеры и основные узлы пневмоэлектростанций мощностью до 4 кВт и условия ее работоспособности.

Определена продолжительность периода непрерывной работы ПЭС на постоянную нагрузку мощностью до 1 кВт в режиме полного отсутствия ветра.

Проведена оценка эффективности такой ПЭС при ее использовании для подогрева воды в плавательном бассейне.

#### Литература

1. Кириллов, И. Ветроэнергетика в Украине [Электронный ресурс] / И. Кириллов, А. Конеченков // УВЭА «Сети и бизнес». – 2014. – № 1 (74). – Режим доступа : <http://asp24.com.ua/blog/vetroenergetika>
2. Куприянов, М. Десять стран с наиболее развитой ветроэнергетикой [Электронный ресурс] / М. Куприянов. – Экоэнергия. – Режим доступа : [http://ecoafisha.ru/renewable\\_energy](http://ecoafisha.ru/renewable_energy)
3. Мухутдинов, И. М. Ветроэнергетические установки и последние разработки в этой области [Электронный ресурс] / И. М. Мухутдинов, А. Г. Орлов, М. С. Фролов. – Оренбургский государственный университет. – Режим доступа : <http://research-journal.org/featured/technical/vetroenergeticheskie-ustanovki-i-poslednie-razrabotki-v-etoy-oblasti>
4. Любас, Д. Ветроэнергетика Украины: потенциал и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д. Любас. – Рубрика Производство и ресурсы. – Режим доступа : <http://electrician.com.ua/posts/view/1280>
5. Пневмоаккумулирующие электростанции – 61 [Электронный ресурс] / Режим доступа : [info.donntu.edu.ua/el\\_izdan/geolog/ucheb&monogr/podz\\_str\\_z](http://info.donntu.edu.ua/el_izdan/geolog/ucheb&monogr/podz_str_z)
6. Яровой, Я. Альтернативная энергетика. Аккумуляция электрической энергии. [Электронный ресурс] / Я. Яровой. – 3 октября, 2013. – Режим доступа : <http://comment.on>
7. Патент № 2208700 Рос. Федерация: МПК F03D9/00]Безредукторный ветроэлектроагрегат [Текст] / Линевиненко А. М., Баркалов В. А. – № 2001129401/06 ; заявл. 31.10.01; опубл.2001, бюл. № 20.
8. Патент № 38569 Украина: МПК F03D9/00 Пневмоэлектростанция [Текст] / Квашнін В. О., Шеласєв, І. П., Квашнін, В. В. – № 200809686; заявл. 24.07.2008; опубл. 2009, бюл. № 1.
9. Ляхтер, В. М. Ветровые электростанции большой мощности. Обзорная информация [Текст] / В. М. Ляхтер. – М. : Информэнерго,1987. – 72 с.
10. Кошкин, Н. И. Справочник по элементарной физике [Текст]: уч. / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. – М. : «Наука», 1975. – 256 с.
11. Горобец, В. Ветроэнергетические установки и последние разработки в этой области [Электронный ресурс] / В. Горобец, 2014. – Режим доступа : <http://vetronet.com>.