

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. Моделювання 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.
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.

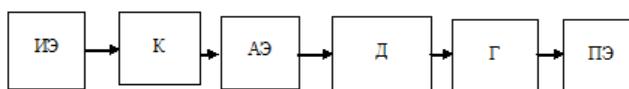


Рис. 1 – Структурная схема ПЭС

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); μ – 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/м² и $T=250$ ($t=-27$ °C) в объеме $V=3,5$ м³ 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

$$\frac{P_1}{P_2} = 20 \text{ составит:}$$

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

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 $S=0,001$ м², 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 $P_{ост.} = P_2 = 4$ атм., будет равна:

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

где $\rho=1,29$ кг/м³ – удельная плотность воздуха при нормальных условиях.

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

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

Тогда средняя скорость заправки \bar{V} одного АЭ объемом $V=3,5$ м³ 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 $V=3,5$ м³ 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], $S_c = H_k \cdot d_k \approx 10$ м² 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 Σ при глубоком разряде составит:

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

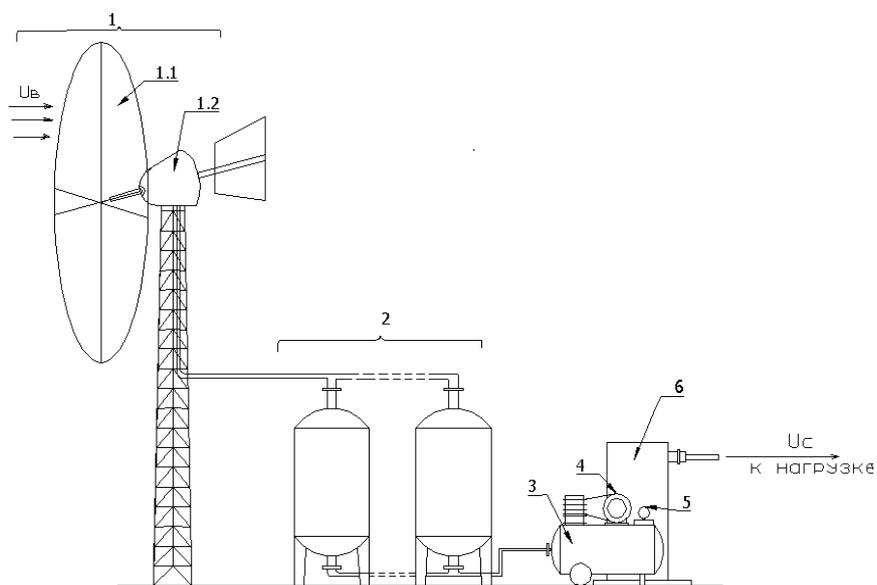


Рис. 2. Пневмоэлектростанция: 1.1 – ветроколесо; 1.2 – компрессор; 2 – АЭ; 3 – декомпрессор; 4 – генератор; 5 – манометр; 6 – блок контрольно-измерительной аппаратуры и управления

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
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
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>.