

УДК 620.93

### Применение энергоэффективных возобновляемых источников энергии в энергетике Республики Беларусь: ветроэнергетические установки

Круподёров Е.С., Семериков К.В.

Научные руководители – к.э.н., доцент КРАВЧЕНКО В.В.,  
д.т.н., профессор КАРНИЦКИЙ Н.Б.

Старт возобновляемой энергетике в Беларуси официально был дан в 2010 году, когда вступил в силу закон «О возобновляемых источниках энергии». Вслед за ним была принята Национальная программа на 2011–2015 годы, которая предусматривала строительство 224 ветроустановок по всей стране. Однако спустя почти три года после появления закона ветряные установки в Беларуси можно пересчитать по пальцам.

В Беларуси в ближайшее время появится атлас ветров и именно он станет толчком дальнейшего развития ветроэнергетики. Сейчас в Беларуси доля выработки энергии с использованием ветра пока еще очень невелика. Ученые возлагают надежды на эту отрасль энергетики, которая по их предположениям скоро станет значительной частью отечественной энергетики, восполняя потребности нашей страны без особого вреда для окружающей среды. Беларусь обладает значительным ветроэнергетическим потенциалом. Он оценивается в 1600 МВт. На территории нашей страны выявлено около 1840 площадок, где можно устанавливать ветроэнергетические станции и даже создавать ветроэнергетические парки.

Для нашей страны использование альтернативных источников энергии является перспективным и выгодным еще и по причине ежегодного повышения тарифов на электроэнергию. Ветер по-видимому, является наиболее старым из всех имеющихся источников энергии, используемым человеком с незапамятных времен.

Причиной возникновения ветра является поглощение солнечного излучения земной атмосферой, приводящее к расширению воздуха и появлению конвективных течений. В глобальном масштабе на эти термические явления накладывается эффект вращения Земли, приводящий к появлению преобладающих направлений ветра. Кроме того, ветровая закономерность определяется местными географическими и экологическими факторами.

Ветер возникает также вследствие того, что температура и давление атмосферного воздуха во всех точках Земли не одинаковы. Солнце с разной силой обогревает различные участки Земной поверхности, что вызывает перепад давлений воздуха. К основным характеристикам ветра можно отнести скорость (силу), которая по шкале Бофорта измеряется в баллах (таблица 1).

Таблица 1 – Шкала Бофорта

Баллы	Характер ветра	Признаки	Скорость, км/ч
0	Безветрие	Дым поднимается вертикально	0-0,2
1	Почти безветрие	Дым поднимается почти вертикально	0,3-1,5
2	Лёгкий ветерок	Ветер едва ощутим	1,6-3,3
3	Слабый ветер	Колышутся листья и флаги	3,4-5,4
4	Умеренный ветер	Качаются веточки	5,5-7,9
5	Свежий ветер	Качаются более крупные ветки	8,0-10,7
6	Сильный ветер	Слышен шум ветра	10,8-13,8
7	Крепкий ветер	Качаются толстые деревья, волнения на воде	13,9-17,1
8	Шквальный ветер	Качаются толстые деревья, трудно идти	17,2-20,7
9	Шквал	Переворачивает легкие предметы, срывает черепицу с крыши.	20,8-24,4
10	Буря (шторм)	Вырывает деревья	24,5-28,4
11	Сильная буря	Разрушает постройки	28,4-32,6
12	Ураган	Опустошает обширные местности	Свыше 32,6

Скорость ветра на разных высотах различна, поэтому различны и воздействия ветра на ветроколеса и предметы, расположенные на разной высоте. На поверхности Земли скорость ветра всегда равна нулю. Затем до высоты, равной примерно высоте расположенных в данном месте различных препятствий (зданий, деревьев и т.д.), скорость ветра увеличивается очень сложным образом.

При стандартных метеорологических измерениях скорость ветра определяется соединением за 10 минутный отрезок времени показаний анемометра находящегося на 10 метровой высоте. Непрерывное измерение скорости ветра осуществляется с помощью специальных анемометров. Направление ветра определяется стороной света откуда дует ветер. Информация о направлении ветра чрезвычайно важна, когда установки размещают в горной местности, вблизи зданий или других ветроэнергетических установок (ВЭУ), или возможно их затенение при некоторых направлениях ветра. На рисунке 1 изображено строение ВЭУ.

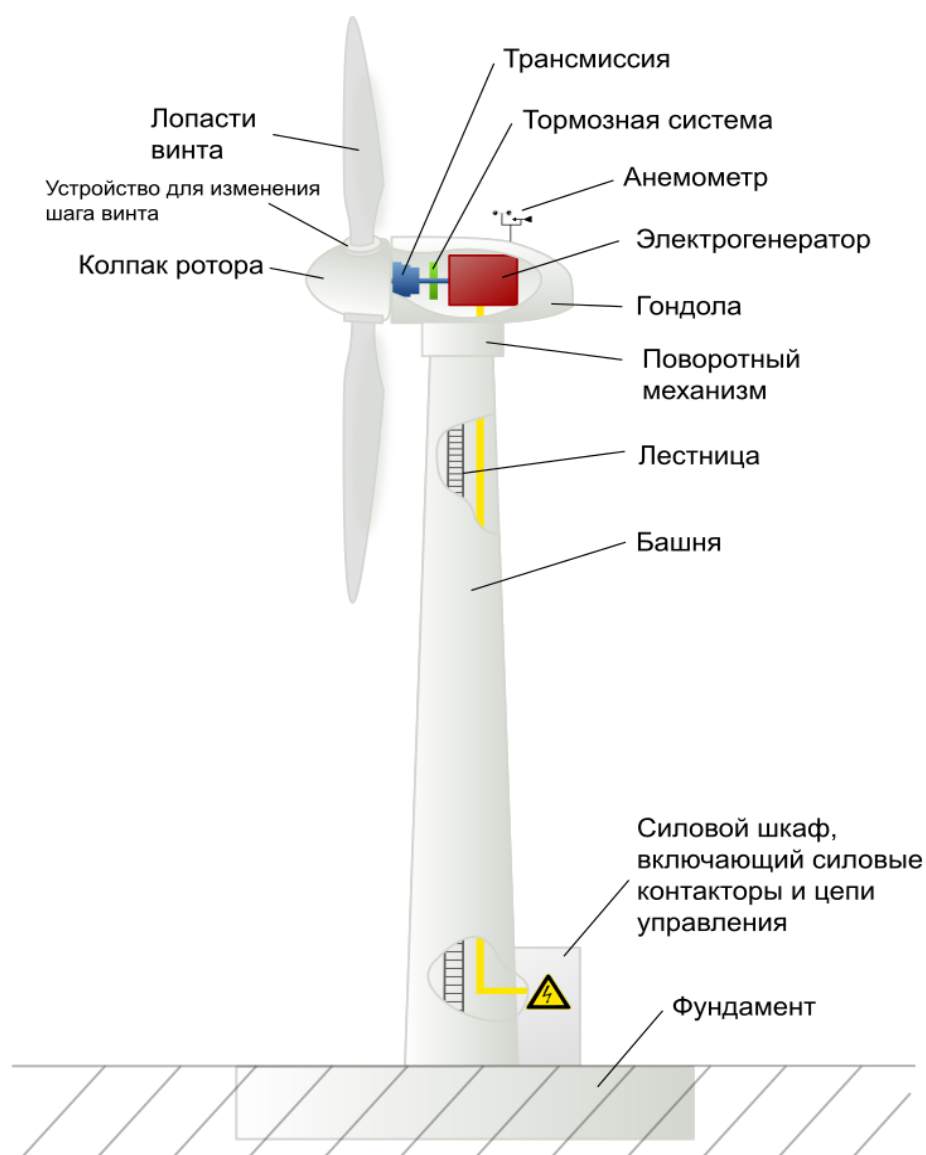


Рисунок 1 – Строение ВЭУ [1]

Роторы ветрогенераторов могут изготавливаться с лопастями из различных материалов и разной степени жесткости. Классические промышленные установки используют жесткие материалы, что дает возможность стабилизировать эксплуатационные параметры изделий во

времени, обеспечить повторяемость характеристик ветрогенераторов и увеличить ресурс лопастей ротора, т.к. жесткая поверхность лучше противостоит воздействию внешней среды.

От степени гладкости поверхности крыла зависит его сопротивление в потоке воздуха, особенно на высоких скоростях вращения ротора. Профиль крыла рассчитывается таким образом, чтобы добиться максимальной эффективности использования ветра, и внешнее воздействие снижает эту эффективность. Поэтому, для производства жестких лопастей для промышленного ветрогенератора используют различные пластмассы, металл и наборное дерево, обработанное особым образом.

Главным отличием лопастей парусного вида является намного меньшая стоимость материала (например, ткань, фанера, тонкие металлические листы и другие, легкие в обработке и доступные в быту подходящие товары из магазина), простота изготовления и ремонта, привлекая многих, изготавливающих ветрогенератор вручную.

Однако самая важная особенность – большая суммарная рабочая поверхность парусных лопастей, т.к. парусный ветрогенератор может стартовать и давать энергию при минимальных значениях скорости ветра – меньше полуметра в секунду. Конечно, парусная лопасть за счет своей неаэродинамической формы снизит эффективность работы по мере увеличения скорости вращения, но задача в данном случае состоит в отборе энергии именно слабого ветра, преобладающего в средних широтах. С этой задачей ротор данного вида справляется лучше остальных, т.к. принцип его действия отличается от принципа ротора с жестким крылом.

### Принцип действия ВЭУ

Основным элементом ветроэнергетической установки является ветроколесо, преобразующее энергию ветра в полезную механическую работу (рисунок 2).

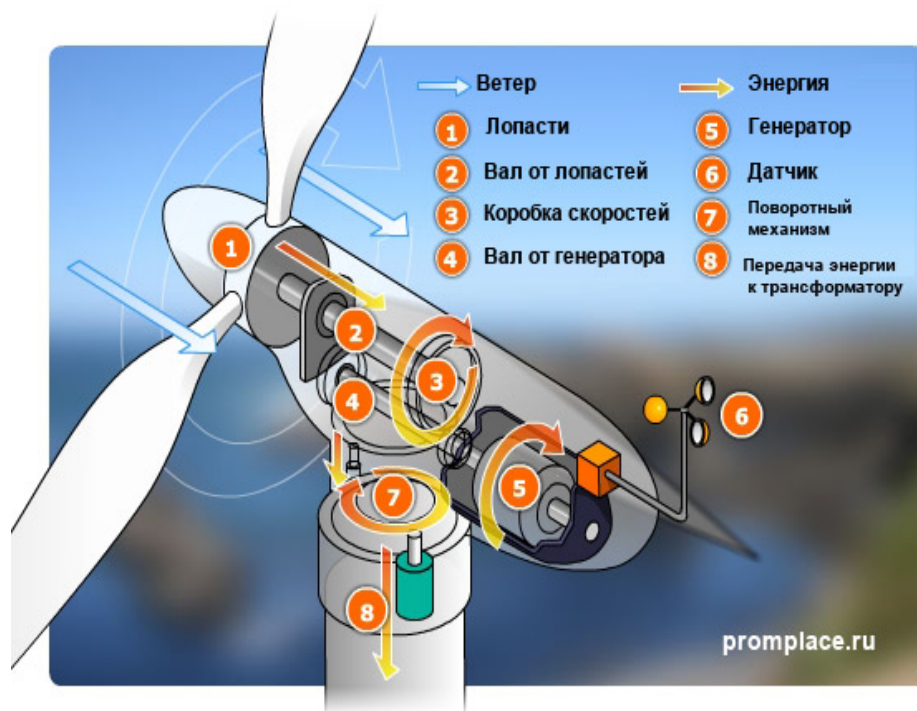


Рисунок 2 – Строение ветряной турбины

На рисунке 2 изображено: 1 – лопасти турбины; 2 – ротор; 3 – направление вращения лопастей; 4 – демпфер; 5 – ведущая ось; 6 – механизм вращения лопастей; 7 – электрогенератор; 8 – контроллер вращения; 9 – анемоскоп и датчик ветра; 10 – хвостовик Анемоскопа; 11 – гондола; 12 – ось электрогенератора; 13 – механизм вращения турбины; 14 – двигатель вращения; 15 – мачта.

Поток воздуха, проходя через поперечное сечение колеса обладает кинетической энергией. При прохождении потока воздуха через ветроколесо скорость его уменьшается, т.е. поток затормаживается.

Эффективность использования ветрогенератором энергии воздушного потока, проходящего через ометаемую ветроколесом площадь  $S$ , характеризует коэффициент мощности  $C$ . На рисунке 3 показано изменение коэффициента  $C$  в зависимости от потери скорости при различных режимах работы ветроколеса: нормальный режим работы ветроколеса в ВЭУ; малоэффективный режим работы ветроколеса из-за сильной турбуликации ветрового потока; работа ветроколеса в режиме воздушного винта, когда энергия передается от винта потоку; работа ветроколеса в режиме воздушного винта при реверсе тяги (торможения самолета во время послепосадочного пробега). Набегающий на ветроколесо воздушный поток действует с силой, равной произведению максимального перепада давления на ветроколесе и площади  $S$  [2].

При расчёте ветроколеса необходимо учитывать величину крутящего момента на выходном валу ветроколеса. В свою очередь на максимальный крутящий момент оказывает влияние быстроходность ветроколеса, равная отношению окружной скорости конца лопастей к невозмущенной скорости набегающего потока.

При проектировании ветроустановки также рассчитывают оптимальную быстроходность, при которой лопасть ротора не попадает в турбулизованный предыдущей лопастью поток. В тоже время поток не должен проходить через сечение ветроколеса без взаимодействия с его лопастями.

Следует отметить, что с увеличением скорости ветра ветровая нагрузка быстро возрастает и при скоростях ветра свыше 15 – 20 м/с ветроколесо может не выдержать нагрузок. Поэтому с целью предупреждения их разрушения используют такие мероприятия как: поворот ветроколеса или его лопастей в нерабочее положение; уменьшение снимаемой мощности, соответственно уменьшению лобового давления; принудительную остановку ветроколеса.

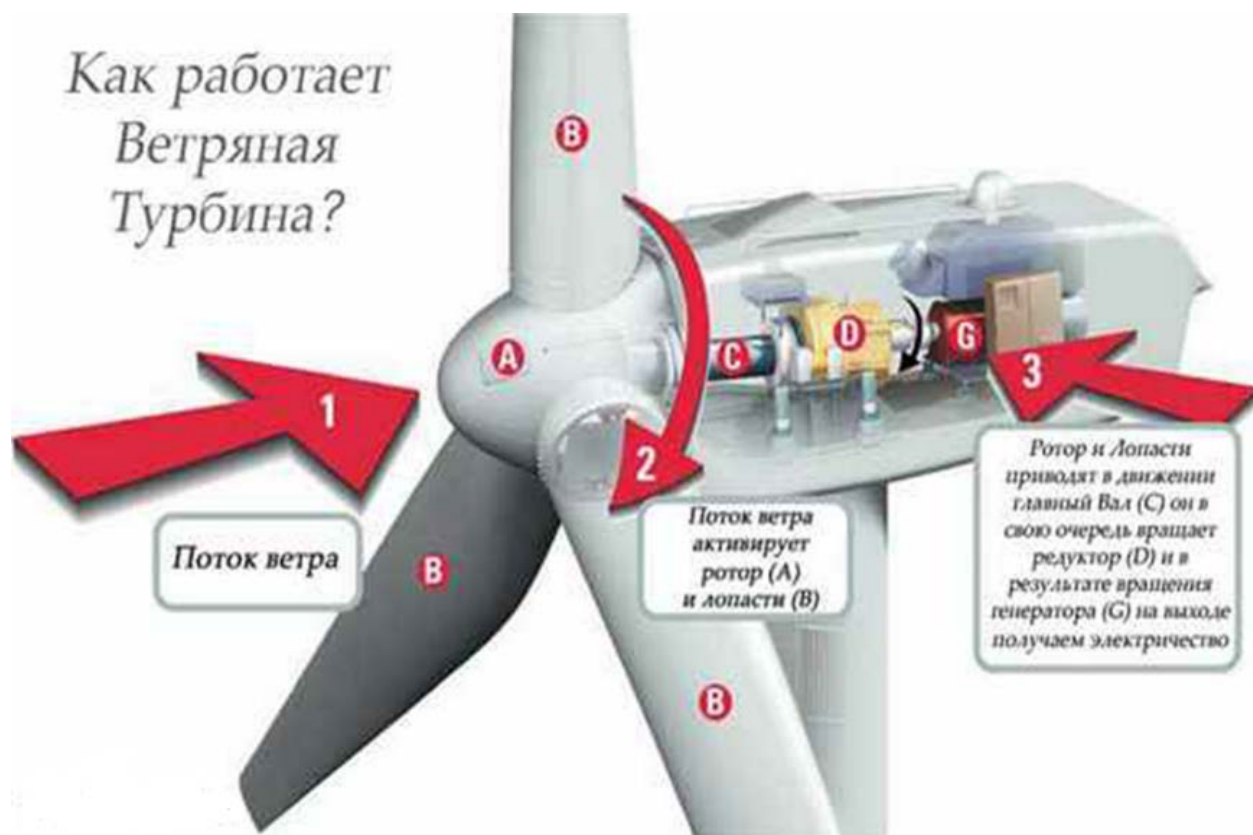


Рисунок 3 – Принцип работы ВЭУ [2]

Характеристики ВЭУ определяются прежде всего непостоянством природы ветра как источника энергии и тем фактом, что развиваемая ими мощность изменяется в зависимости от площади ометаемой ветроколесом, и скорости ветра. Вследствие кубической зависимости

мощности от скорости ветра и его непостоянства действительная выработка ветродвигателя за длительный период может быть значительно выше выработки, подсчитанной по средней скорости ветра за это время.

В качестве критерия рассматривается и расположение ветроколеса над поверхностью земли, поскольку скорость ветра с высотой увеличивается. Местные особенности изменения скорости ветра возникают вследствие, с одной стороны, ее увеличения над пологими возвышенностями и другими объектами вокруг них, а с другой, уменьшения скорости потока вблизи деревьев, зданий и других препятствий.

Кроме того, значение мощности ветроустановок ограничивается напряжениями в материале, которые, в свою очередь, ограничивают размеры лопастей, опор и других элементов, высоту башни. В результате, когда необходимо получить большие мощности от групп ВЭУ, вырабатывающих электроэнергию (например, 100 МВт), каждая из них должна состоять из некоторого числа ВЭУ меньшей мощности (например, в несколько мегаватт каждая), работающих в энергосистеме. Для энергосистем с участием ВЭУ могут также найти применение ветроустановки большой мощности с генераторами вихрей.

### **Требования к ВЭУ**

С точки зрения применения ВЭУ могут классифицироваться в основном по типу мощности и требованиям к непрерывности и качеству энергии. Во многих случаях без нарушения процессов, подача энергии должна быть непрерывной лишь в течение коротких промежутков времени. К таким процессам относятся помол зерна или других материалов, подача воды для орошения и водоснабжения домашнего скота, перекачивание воды в резервуары, сушка сельскохозяйственных культур или других материалов, получение электрическим путем водорода, используемого в качестве топлива, и т.п.

Если потребителю необходима постоянная подача энергии, то ВЭУ должна работать совместно с резервным энергоисточником, например, с дизель – генераторной установкой, энергосистемой и т.п., или же должна быть предусмотрена система аккумулирования энергии, например батареи, гидроаккумулирующие резервуары, аккумуляторы сжатого воздуха, инерционные аккумуляторы, установки для аккумулирования электролитически полученного водорода для последующего использования на электростанциях и т.д.

### **Критерии оценки**

В большинстве случаев применения ВЭУ ставится цель минимизировать стоимость системы с учетом срока ее службы и, следовательно, стоимость производимой энергии. Это требует, чтобы были минимальными удельные капитальные затраты на сооружение ВЭУ, включая аккумулирующие устройства. Необходимо также, чтобы ВЭУ с учитывала требования по минимизации эксплуатационных затрат на протяжении срока ее службы при соответствующем проектировании ее элементов, в частности лопастей, генератора, опорных устройств, передач, башни, аккумулирующих устройств и пр. элементов. К другим критериям, которые должны быть учтены для определения эффективности ВЭУ, относятся:

- срок окупаемости затрат энергии ВЭУ, т.е. время, необходимое для того, чтобы ВЭУ выработала то количество энергии, которое было затрачено на ее изготовление, а также на работу и обслуживание за определенный период;
- доля полезно используемой энергии ВЭУ, т.е. соотношение количеств энергии, вырабатываемой ВЭУ за срок ее службы и потребляемой при ее производстве, для работы и обслуживания за этот же период;
- различные факторы, связанные с окружающей средой, эстетикой, юридическими, финансовыми, социальными и другими вопросами, которые могут иметь влияние на общественное признание ВЭУ, их приемлемость для общественных или частных потребителей.

**Достоинства ВЭУ:** экологически-чистый вид энергии – производство электроэнергии с помощью «ветряков» не сопровождается выбросами CO<sub>2</sub> и каких-либо других газов; **эргономика** – ветровые электростанции занимают мало места и легко вписываются в любой ландшафт, а также отлично сочетаются с другими видами хозяйственного использования территорий; **возобновляемая энергия** – энергия ветра, в отличие от ископаемого топлива,

неистоцима; **ветровая энергетика** – лучшее решение для труднодоступных мест, т.к. для удалённых мест установка ветровых электрогенераторов может быть лучшим и наиболее дешёвым решением.

**Недостатки ВЭУ: нестабильность** – заключается в негарантированности получения необходимого количества электроэнергии. На некоторых участках суши силы ветра может оказаться недостаточно для выработки необходимого количества электроэнергии; **относительно невысокий выход электроэнергии** – ветровые генераторы значительно уступают в выработке электроэнергии дизельным генераторам, что приводит к необходимости установки сразу нескольких турбин. Кроме того, ветровые турбины неэффективны при пиковых нагрузках; **высокая стоимость** – стоимость установки, производящей 1 мегаватт электроэнергии, составляет 1 миллион долларов; **опасность для дикой природы** – вращающиеся лопасти турбины представляют потенциальную опасность для некоторых видов живых организмов. Согласно статистике, лопасти каждой установленной турбины являются причиной гибели не менее 4 особей птиц в год; **шумовое загрязнение** – шум, производимый «ветряками», может причинять беспокойство, как диким животным, так и людям, проживающим поблизости.

#### **ВЭУ, подключённые к сетям ГПО «Белэнерго»**

Республика Беларусь относится к странам, не обладающим значительными количеством собственными топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), в связи с чем в республике большое значение уделяется энергетической безопасности. Поэтому, учитывая постоянное удорожание традиционных энергоносителей, а также их увеличивающийся мировой дефицит, в 2010 году возникла необходимость замещения этих ТЭР местными и возобновляемыми видами.

Развитие возобновляемой энергетики страны определил Закон Республики Беларусь от 27 декабря 2010 г. № 204-З «О возобновляемых источниках энергии».

По состоянию на 1 сентября 2017 г. организациями Министерства энергетики эксплуатируется одна ветроэнергетическая станция установленной мощностью 9 МВт (6 ветрогенераторов по 1,5 МВт каждый) [3], расположенная у д. Грабники на территории Новогрудского района Гродненской области. Здесь же в середине 2017 года частной компанией был введен в эксплуатацию ветряк мощностью 3,3 МВт. Ветроэнергетическая установка, появившаяся у д. Большие Лезневичи, стала самой мощной в Беларуси. Высота ее превысила 110 м, длина лопастей – 52 м, общий вес конструкции составляет около 500 т.

Таблица 2 – данные по ВЭУ, подключенных к электросетям энергоснабжающих организаций ГПО «Белэнерго», за период с 2015 по 2016 гг. [3]

ВИЭ, подключенные к электросетям энергоснабжающих организаций ГПО «Белэнерго»	Установленная мощность, МВт		ИЗМЕНЕНИЕ (рост, падение)	
	по итогам года		МВт	%
	2015	2016		
Всего	92,4	151,3	58,9	163,72%
ветер	46,6	62,0	15,4	133,02%
ВИЭ, подключенные к электросетям энергоснабжающих организаций ГПО «Белэнерго»	Выработка электроэнергии, всего, млн кВт·ч		ИЗМЕНЕНИЕ (рост, падение)	
	по итогам года		млн кВт·ч	%
	2015	2016		
Всего	181,9	234,0	52,1	128,66%
ветер	43,6	62,9	19,3	144,36%
ВИЭ, подключенные к электросетям энергоснабжающих организаций ГПО «Белэнерго»	Поставка электроэнергии в сеть РУП-облэнерго, млн кВт·ч		ИЗМЕНЕНИЕ (рост, падение)	
	по итогам года		млн кВт·ч	%
	2015	2016		
Всего	173,1	225,7	52,6	130,37%
ветер	43,6	62,7	19,1	143,82%

Из таблицы 2 видно, что установленная мощность ВЭУ, подключенных к электросетям энергоснабжающих организаций ГПО «Белэнерго», в 2016 году по сравнению с 2015 годом увеличилась на 33,02%, вследствие чего выработка ими электроэнергии и поставка электроэнергии в сеть РУП-облэнерго выросли соответственно на 44,36% и 43,82% за тот же период. Это свидетельствует об ежегодном увеличении в республике темпа строительства и ввода в эксплуатацию ВЭУ.

Таким образом, в Республике Беларусь есть необходимые условия для развития ветроэнергетики, а именно высокое количество пригодных площадок, высококвалифицированные кадры и опыт международного научного сотрудничества. Ветер может помочь государству решить проблему энергетической зависимости от соседних стран.

### Литература

1. Строение ветрогенератора // Ветряные электростанции [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: [http://windypower.blogspot.com.by/p/blog-page\\_7121.html](http://windypower.blogspot.com.by/p/blog-page_7121.html) – Дата доступа: 19.10.2017.
2. Принцип работы ветряной турбины [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://www.altagroup.com/wind.htm> – Дата доступа: 19.10.2017.
3. Возобновляемая энергетика // ГПО «Белэнерго» [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://www.energo.by/ve/p10.htm>. – Дата доступа: 19.10.2017.