

8. Pavlyuchenko, V.V. Differential Background of Electric Signal Read- from an Induction Magnetic Head / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testin. – 2021. – Vol. 57, № 8. – P. 706–716.

УДК 620.9

Эффективность ветроэнергетики для Беларуси

Кириленко А. И., Хведченя В. А.

Белорусская государственная академия авиации
Минск, Республика Беларусь

В работе рассматриваются вопросы эффективности ветроэнергетики в условиях Беларуси. Подчеркивается, что в стране имеются условия для успешного развития этой отрасли. Акцентируется внимание на нерешенных вопросах, таких как развитие малой ветроэнергетики, утилизация отходов, необходимость развития сопутствующих отраслей, таких как водородная энергетика. Для повышения эффективности ветроэнергетики необходимо расширять функции этой техники, в частности, использовать разрежение воздуха в лопастях. Полноценный расчет экономической эффективности возможен только при учете экологических факторов.

Использование возобновляемых энергоресурсов – общемировая тенденция развития энергетики, независимо от того, какие аргументы выдвигаются в ее обоснование. В Беларуси диапазон доступных возобновляемых энергоресурсов ограничен: это ветровая, солнечная энергия и биомасса (включая леса). Мы сосредоточимся на анализе возможностей использования энергии ветра.

Такое использование может идти по двум направлениям. Строятся ветропарки с ветроэнергетическими установками (ВЭУ) большой мощности, работающие на единую энергосистему страны. Причем чем больше мощность, тем эффективнее ВЭУ. Крупнейший на сегодня дает мощность 9,0 МВт (6 объединенных ВЭУ Vestas V66 по 1,65 МВт) в Гродненской области [1]. В него вложено 5,6 млн долл. Кроме того, подобные ветропарки имеются в Гродненской и Витебской областях. Второе направление – это эксплуатация установок малой мощности в тех регионах, где энергопотребление не велико, а потери в линиях электропередач существенны. Таким установкам, которые могли бы успешно производиться в нашей стране, пока уделяется мало внимания. Как видим, для широкомасштабного использования ветра необходима большая подготовительная работа по выбору места строительства, обоснованию экономической целесообразно-

сти, включая сроки окупаемости, и оценке экологических последствий такой дорогостоящей деятельности. Тем не менее, опыт такой работы накоплен [2]. Выявлено 1840 площадок пригодных для размещения ВЭУ, что может обеспечить установленную мощность 4600 МВт с годовой выработкой порядка 10^{10} кВт-ч электроэнергии (ЭЭ). Расчеты показывают, что ветроэнергетика в Беларуси по своим технико-экономическим (капитальные затраты, сроки строительства, окупаемость) и экологическим показателям выгоднее ядерной энергетики [3]. Выработка энергии на ВЭУ может составить до 20 % потребности страны в ЭЭ, сейчас – 1,9 %.

Что касается эксплуатации ВЭУ, то здесь также много «подводных камней». Для ее полноценной работы необходим ветер со скоростью 3–5 м/с, а при скорости 25 м/с генерация прекращается. Считается хорошим показателем, если ВЭУ выдает треть от своей максимальной мощности. Крайнее неудобство – непостоянство ветра и, как следствие, непостоянство выработки энергии. Потому возникает потребность в аккумулировании энергии, каждая ВЭУ должна иметь аккумуляторные батареи. Однако эти устройства крайне враждебны к окружающей среде как при их производстве, так и при утилизации. С учетом этого фактора все расчеты эффективности ВЭУ теряют свое значение. Свинцово-кислотная батарея имеет удельную энергию 30–35 Вт-ч/кг (выдерживает 300 циклов заряд-разряд), для натрий-серной батареи имеем в среднем 220 Вт-ч/кг и до 4000 циклов. Для накопления значительных запасов энергии необходимо много аккумуляторов. Таким образом, это заведомо тупиковый путь. Нужны другие накопители энергии. Перспективным выглядит водород. Отметим, что на данный момент простых и эффективных способов получения водорода не существует. Тем не менее, перспективы его применения особенно на транспорте крайне заманчивы. В городах применение водорода в двигателях транспортных средств сулит достичь нулевого выброса загрязняющих веществ. То же самое и в авиации, где всерьез рассматривается концепция полностью электрического самолета. Дело в том, что водород будет использоваться не в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания, а в качестве энергоносителя для топливных элементов и прямого преобразования химической энергии в электрическую с высоким КПД. Опыт такого применения имеется со времен полета Апполонов на Луну (1969 г.). Конечно, до полномасштабного использования водорода еще далеко, но это очень заманчивая перспектива.

Представляется, что имеется еще один путь повышения эффективности применения ВЭУ. Ее лопасти в 55 метров совершают 5–10 оборотов в минуту в зависимости от скорости ветра. Самая большая ВЭУ Enercon E126 имеет лопасть в 63 м. Лопасти делают состоящими из двух половинок затем соединяющихся, то есть внутри лопасти имеется полость, обеспечи-

вающая ей легкость. Это означает, что на оси лопасти имеет место значительное разрежение воздуха. Расчет дает, что концентрация молекул воздуха вдоль лопасти изменяется по закону

$$n(r) = n_0 \exp\left(-\frac{M\omega^2}{2RT} r^2\right),$$

где n_0 – концентрация молекул газа на оси ВЭУ; $n(r)$ – концентрация газа на расстоянии r от оси; M – молярная масса газа; ω – циклическая частота вращения ротора; R – газовая постоянная; T – температура.

Испаря жидкость при низком давлении в области оси ВЭУ и откачивая пары, можно очищать вещество. При этом часть жидкости может замораживаться. Заманчиво использовать такое разрежение. Кроме того, вращающиеся лопасти имеют внушительный запас кинетической энергии. Можно принять массу крыла 7 тонн и аппроксимировать профиль пластинкой. Получаем запас вращательной энергии $0,959 \cdot 10^6$ Дж (5 об/мин) и $3,838 \cdot 10^6$ Дж (10 об/мин).

В предлагаемых расчетах не учтена экологическая составляющая. А она существенна и многофакторна. Тень от лопастей отбрасывается на километры, шум распространяется на сотни метров. Особая проблема – инфразвуки. Ими не занимается никто. Если ВЭУ располагаются на путях миграции птиц, то они для них представляют существенную угрозу [4]. Однако поверхности лопастей делают с хорошим аэродинамическим качеством. Не представляет труда сделать их хорошо отражающими. Перемещающий лазерный луч по радиусу круга, описываемого лопастями, можно создать в окружающем пространстве световые импульсы (блики), распространяющиеся по различным направлениям. Такие приемы используются для отпугивания птиц на аэродромах. Постоянно идет процесс совершенствования техники и устаревшие установки заменяются более эффективными. В США в год выбрасывают более 8 тыс. лопастей, Европа к 2030 г. – 17 тыс. лопастей. Дорогостоящие технологии позволяют переработать лопасть на 42 %. Предстоит создать технологии рециркуляции, которые позволят обеспечить нулевой уровень отходов по всей цепочке от проектирования до производства.

Кроме того, следует учесть выбросы парниковых газов при производстве ВЭУ. 80 % выбросов CO_2 приходится на сырьевые материалы и компоненты ВЭУ при ее производстве: лопасти – 20 %; башня – 25 %; фундамент – 13 %; гондола – 13 %; генератор, двигатель, инвертор, ротор – 9 %. Остальные 20 % приходятся на монтаж ВЭУ на площадке, ремонт и замену оборудования, а также его вывод из эксплуатации. Не лишне напомнить и

про водяной след при производстве ВЭУ. Расход воды на производство 1 тонны стали составляет 6 м^3 при применении оборотного водоснабжения, без него – порядка $300\text{--}600 \text{ м}^3/\text{тонн}$. Как видим, давление на окружающую среду колоссальное и не учитывать его в экономических расчетах невозможно.

Мы наблюдаем своеобразную конкуренцию между ВЭУ и солнечными панелями. Для сравнения эффективности рассмотрим годовую выработку ЭЭ W и срок окупаемости энергоустановки (ЭУ) T .

Расчет ведем по формуле

$$W = P_{\text{н}} \cdot k_i \cdot t,$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность, кВт; k_i – коэффициент использования номинальной мощности энергоустановки; $t = 8760$ – количество часов в году.

Окупаемость энергоустановки можно вычислить как

$$T = \frac{C_k}{1 + k_s - k_z} \cdot C_a \cdot k_i \cdot t,$$

где C_k – удельные капитальные затраты, USD/кВт; k_s – коэффициент дополнительной выгоды от сокращения выбросов парниковых газов, уменьшения стоков и пр.; k_z – коэффициент дополнительных эксплуатационных затрат на обслуживание ЭУ и текущий ремонт, закупку сырья, эксплуатацию электросетей, амортизационные расходы, налоги, отчисления на погашение кредитов, захоронение отходов и другие дополнительные затраты; C_a – тариф на ЭЭ для производителей ЭЭ.

Коэффициенты использования номинальной мощности панели в теории $0,88\text{--}0,95$, на практике $0,13\text{--}0,19$ (для гибридных панелей $0,41\text{--}0,43$); для ВЭУ – в теории $0,59$, на практике – $0,25\text{--}0,38$ (для современных технологий – $0,40\text{--}0,45$). Срок окупаемости обычной панели 1–4 года, инновационной – примерно год; для ВЭУ – 3–15 и более лет. Срок эксплуатации панели 20–0 лет, ВЭУ – примерно 25 лет. Полными данными по нагрузке на окружающую среду при производстве, эксплуатации и утилизации тех и других установок мы не располагаем.

Для Беларуси актуально сравнение ветроэнергетики с атомной [5]. Она в Европе объявлена вполне экологичной на фоне газового кризиса. Приведем сравнительный анализ строительства ВЭУ и АЭС (табл. 1).

Таблица 1

Эффективность строительства ВЭУ и АЭС в Беларуси

Наименование	Вариант ВЭУ		АЭС
	реновированная	новая	
Коэффициент использования номинальной мощности, W	0,25	0,25	0,7
Тариф на электроэнергию, USD/кВт·ч	0,124	0,124	0,077
Номинальная мощность ВЭС, МВт	1,5	1,5	1200
Коэффициент k_s	0,05	0,05	0
Коэффициент k_z	0,25	0,25	0,5
Удельные капитальные затраты, USD/кВт	670	1330	5500
Годовая выработка электроэнергии, ГВт·ч	3,285	3,285	7358
Срок окупаемости, лет	3,1	6,1	23,3

В заключение приведем технико-экономические характеристики ЭУ различных типов (табл. 2).

Таблица 2

Технико-экономические показатели различных ЭУ в Беларуси

Наименование	Капитальные затраты, USD/кВт	Срок строительства, лет	Срок окупаемости, лет
Ветроэнергетика	1500–2000	1	Менее 8
Солнечная энергетика	1800–3900	–	Более 29
Малая гидроэнергетика	7000 и более	4–5	Более 20
Энергетика биомассы	2500–3500	1–2	Менее 8
Атомная энергетика	4500–5500	6–8	Более 20

Как следует из приведенного анализа на данном этапе эффективность ВЭУ действительно ниже, чем солнечных панелей, но суммарное экологическое давление ветряки оказывают меньшее. Имеются перспективы совершенствования ветроагрегатов, особенно в плане совмещения функций техники. Имеются перспективы полной экологически безопасной утилизации ВЭУ.

Настоящий прорыв в ветроэнергетике возможен только при подъеме генераторов посредством аэростатов на большую высоту в несколько сотен метров, где ветер сильнее и устойчивее. С большой высоты до земли не доходит шум, генерируемый лопастями. Лопастя не создают препятствий для птиц и не загромождают пейзаж. Передача энергии на землю

также не представляет проблем, поскольку тросы, удерживающие аэростат, одновременно являются и кабелями для передачи энергии.

Литература

1. Олехнович, В. Ветропарк под Новогрудком: сколько стоили ветряки, сколько они экономят и когда окупятся / В. Олехнович // Onliner [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://tech.onliner.by/2017/06/15/vetropark-pod-novogrudkom>. – Дата доступа: 05.10.2021.
2. Олешкевич, М. М. Нетрадиционные источники энергии: уч.- метод. пособие для студ. вузов / М. М. Олешкевич, Ю. А. Лосюк. – Минск: БГПА, 2001. – С. 21–67.
3. Ермоленко, Б. В. Экологические аспекты ветроэнергетики / Б. В. Ермоленко [и др.] // Теплоэнергетика. – 2011. – № 11. – С. 68–72.
4. Хамчуков, Д. Ю. Необходимость развития ветроэнергетики в Республике Беларусь и сдерживающие его препятствия / Д. Ю. Хамчуков, Н. Г. Кротова // Белорусский экономический журнал. – 2020. – № 4. – С. 36–51.
5. Олешкевич, М. М. Перспективы ветроэнергетики в Беларуси / М. М. Олешкевич // Энергетика: материалы 6-ой междунар. науч.-технич. конф., Минск / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2004. – С. 11–15.

УДК 534.521

Моделирование движения тел в атмосфере

Кириленко А. И.¹, Кириленко Т. Д.², Рубанов И.В.¹

¹Белорусская государственная академия авиации,
²Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Рассматриваются модели, описывающие падение тел в сплошных средах с различными законами сопротивления: вязкое трение, аэродинамическое сопротивление с постоянным аэродинамическим коэффициентом и с аэродинамическим коэффициентом, зависящим от скорости. Устанавливаются общие черты этих явлений. Показано, что во всех случаях на начальном этапе движения скорость падения быстро нарастает, а затем происходит достаточно резкий переход к падению с небольшим ускорением (с установившейся скоростью). Определяются те моменты