

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РОТОРНОЙ ВЕТРОУСТАНОВКИ С ВИНТОВЫМИ ЛОПАСТЯМИ НА СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ООО «ЭНЕРДЖИ СЕВАСТОПОЛЬ»

В.А. Сафонов, Н.И. Варминская, Н.С. Мамонтов, А.А. Восканян

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»  
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
E-mail: nvarminska@gmail.com

В статье представлены результаты исследования экспериментальной роторной ветроустановки с винтовыми лопастями, установленной на территории станции ООО «Энерджи Севастополь», получена ее мощностная характеристика, рассчитаны энергетические показатели.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, вольтамперная и мощностная характеристики, выработка электроэнергии.

**Введение.** Ветроэнергетические установки (ВЭУ) подобного типа начинают работать при малых скоростях ветра, что имеет место в приземном слое. Это обстоятельство привлекательно для монтажа этих ВЭУ на свободных площадях солнечной электростанции, где уже имеются инверторы, подстанции, кабельные линии к потребителям, дороги для обслуживания станции. При этом сокращаются расходы на охрану станции и пр.

Кроме этого, солнечная станция имеет большую выработку в летнее время и малую – в осенне-весенне-зимний период, в то время как ветроустановки – наоборот. Таким образом, комплексное использование ВЭУ и солнечной станции не только увеличит общую выработку электроэнергии, но и выровняет ее в зимнее и летнее время. Кроме того, ВЭУ могут выдавать электроэнергию не только днем, но и в утреннее, вечернее и ночное время, когда фотоэлектрические панели малоэффективны.

**Описание и технические характеристики генераторной установки ветряка.** Генераторная установка выполнена в виде статора, включающего в себя катушки, вырабатывающие электрический ток, и ротора, состоящего из двух частей в виде дисков из магнитомягкого материала, на которых на определенном удалении от центра по окружности установлены постоянные магниты с высокой остаточной намагниченностью из материала Nd-Fe-B. На статоре генератора размещаются диодные мосты для вып-

рямления вырабатываемого им тока. Статорные обмотки представляют массив из бескаркасных катушек определенных размеров и способом намотки, залитых в общей конструкции статора. Расположение катушек относительно магнитов выбрано так, чтобы обеспечивать наименьшую вибрацию на валу при подключении нагрузки.

В связи с этим генератор вырабатывает полифазный переменный ток, который выпрямляется установленными на статоре диодными мостами, и отдается в нагрузку уже в виде постоянного тока по двухжильному силовому кабелю, выходящего из генератора. Генератор размещается в головной части ветроколеса, и жестко соединен с ним при помощи общего вала, являющегося рабочей осью вращения ветроколеса.

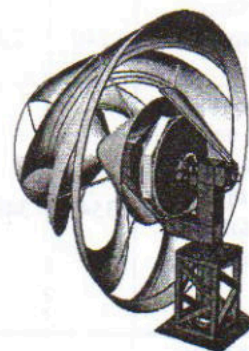


Рис. 1. Общий вид ветрогенератора

На рис. 1 показан общий вид ветрогенераторной установки, состоящей из ветроколеса, генератора, защитного ко-

жуха генератора, тормозной системы, подвижной опоры ветроколеса, обеспечивающей вращение вокруг вертикальной оси на  $180^\circ$ , и неподвижной части опоры ветроколеса для фиксации ветрогенератора на месте его установки.

Генератор, устанавливаемый на данное ветроколесо, может выпускаться в нескольких вариантах, отличающихся только номинальным напряжением, которое они могут вырабатывать на холостом ходу при минимальной скорости вращения. Минимальной скоростью вращения является скорость вращения генератора (измеряемая в количестве оборотов за одну минуту), при которой на силовом выходе генератора без подключенной нагрузки развивается номинальное напряжение [1].

В ходе испытаний ветроколеса, минимальная скорость вращения генератора была выбрана на уровне 30 оборотов в минуту. В соответствии с этим были разработаны, сконструированы и испытаны генераторы трёх различных модификаций с номинальным напряжением 24, 48 и 460 В соответственно. Технические характеристики генераторов производителя представлены ниже в табл. 1.

**Таблица 1.** Технические характеристики генераторов

Номинальное напряжение холостого хода, В	24	48	460
Минимальная скорость вращения, об/мин.	30	30	30
Максимальная скорость вращения, об/мин.	240	240	240
Максимальная мощность на согласованной нагрузке при максимальной скорости вращения, Вт	3540	3480	3320
Внутреннее сопротивление генератора, Ом	1,2	5,1	488

Максимальная скорость вращения, указанная в табл. 1, не является предельно допустимой для выпускаемых генераторов и отражает только максимальную

скорость вращения, целесообразную для измерения по причине того, что ветроколесо является тихоходным и не часто достигает указанной скорости.

Стенд состоит из электродвигателя с регулируемой скоростью вращения, редуктором с изменяемым передаточным отношением и выходным валом для установки генератора, цифровой контрольно-измерительной аппаратуры – тахометр на валу генератора, амперметр постоянного тока, вольтметр постоянного тока, блока регулируемой нагрузки резистивного типа. Согласованной нагрузкой является регулируемое нагрузочное сопротивление мощностью 5000 Вт, сопротивление которого подбирается равным внутреннему сопротивлению генератора.

Первые два типа генераторов на 24 и 48 В предназначены для зарядки аккумуляторных батарей соответствующего напряжения при помощи контроллера ветрогенератора. Генератор с номинальным напряжением 460 В предназначен для использования в составе с промышленным инвертором для солнечных батарей и подключается напрямую ко входу солнечного инвертора. Элементами управления являются только контроль пуска и торможения, а также регулируемая автоматическая защита от избыточного напряжения на выходе генератора.

**Методика снятия мощностной характеристики экспериментальной ВЭУ.** Измерение мощностной характеристики ВЭУ осуществляется путём подключения к генератору вольтметра – параллельно, последовательно амперметра и подключения нагрузки, а затем поочередным регулированием изменять её (рис. 2). В качестве амперметра и вольтметра используем мультиметр DT830B. В качестве нагрузки были использованы 5 лампочек мощностями:  $n_1 = 15$  Вт,  $n_2 = 200$  Вт,  $n_3 = 60$  Вт,  $n_4 = 300$  Вт,  $n_5 = 300$  Вт. Методика измерения мощностных характеристик ВЭУ заключается в поочередном подключении лампочек и измерении напряжения и тока, выдаваемых генератором, после чего можно рассчитать выдаваемую мощность. Осуществлялась следующая цепочка вариативности измерений:  $n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5$ ,  $n_1 + n_2 + n_3 + n_4$ ,  $n_1 + n_2 + n_3$ ,  $n_1 + n_2$ .

Также с помощью мультиметра были определены экспериментальным путём сопротивления лампочек, которые равны  $R_1 = 379 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20,4 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 61 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 13,3 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 13 \text{ Ом}$ . Соответственно суммарное сопротивление равно  $7,95 \text{ Ом}$ .

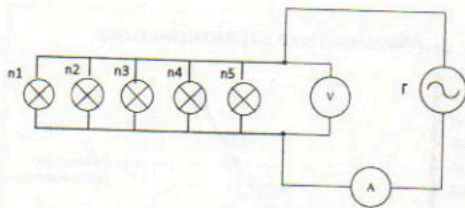


Рис. 2. Измерительная схема

Согласно [2] рекомендуются правила снятия мощностной характеристики ВЭУ:

1. Измерение мощностной характеристики ВЭУ (зависимости вырабатываемой мощности от скорости ветра) проводят, как правило, в натуральных условиях в естественном ветровом потоке.

2. Выбор места испытаний должен быть произведен так, чтобы в преобладающем направлении ветра впереди и сзади ВЭУ на расстоянии не менее 50 м не было препятствий (деревьев, построек), создающих искажение ветрового потока и могущих привести к ошибкам в измерениях действительной скорости ветра.

**Построение ВАХ, мощностной характеристики, расчёт мощности ветрогенератора.** В ходе исследований были получены мощностные характеристики при скоростях ветра в диапазоне от 2 до 6 м/с. В табл. 2, 3 представлены токи, напряжения и мощности для различного количества подключенных ламп при скоростях ветра 2 и 6 м/с (характеристики для скоростей ветра 3 – 5 м/с здесь не приведены).

Исходя из данных (табл. 2, 3), построены ВАХ и мощностная характеристика данной установки при скорости ветра 6 м/с, которые представлены на рис. 3.

В табл. 4 представлена зависимость коэффициента использования ветра  $C_p$  от вырабатываемой мощности ветроустановкой.

Таблица 2. Характеристики ветрогенератора при скорости ветра 2 м/с

Количество ламп / Вт	Ток I, А	Напряжение U, В	Мощность N, Вт
1/15	0,01	25	0,25
2/215	0,07	9,5	0,67
3/275	0,14	5,5	0,77
4/575	0,21	4,3	0,9
5/875	0,43	3,1	1,35

Таблица 3. Характеристики ветрогенератора при скорости ветра 6 м/с

Количество ламп / Вт	Ток I, А	Напряжение U, В	Мощность N, Вт
1/15	0,05	99	4,95
2/215	0,45	62	27,7
3/275	0,75	54	40,5
4/575	1,1	44	48,4
5/875	1,5	39	58,5

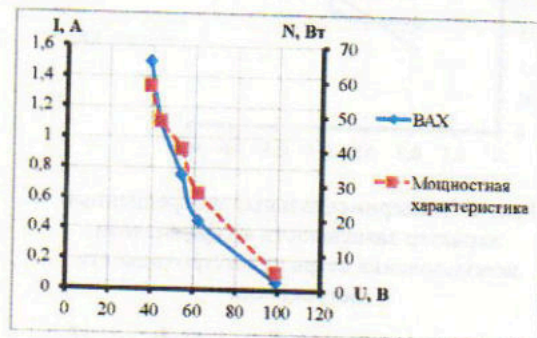


Рис. 3. ВАХ и мощностная характеристика исследуемой модели (при  $V = 6 \text{ м/с}$ )

Коэффициент быстроходности ротора  $Z$  вычисляется по формуле

$$Z = \frac{\omega R}{V} = \frac{4,71 \cdot 0,75}{6} = 0,59,$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ветроколеса;  $R$  – радиус колеса;  $V$  – линейная скорость.

Также построена зависимость коэффициента использования ветра от быстроходности ротора  $Z$ , представленная в табл. 5 и на рис. 4.

Результат наложения полученных точек на известную характеристику для двух-, трех-, четырех- и шестилопастных ветряков представлен на рис. 5 ( $i$  – количество лопастей).

Таблица 4. Зависимость  $C_p$  от вырабатываемой мощности при полной нагрузке

Мощность $N$ , Вт	Коэффициент использования ветра $C_p$
1,35	0,16
5,1	0,17
15,9	0,23
36,25	0,27
58,5	0,25

Таблица 5. Зависимость  $C_p = f(Z)$

Коэффициент использования ветра $C_p$	Коэффициент быстроходности $Z$
0,16	0,19
0,17	0,37
0,23	0,39
0,27	0,47
0,25	0,59

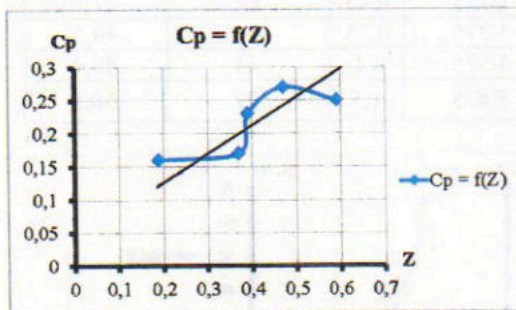


Рис. 4. Экспериментальный и усредненный характер зависимости коэффициента использования ветра от быстроходности ветроколеса

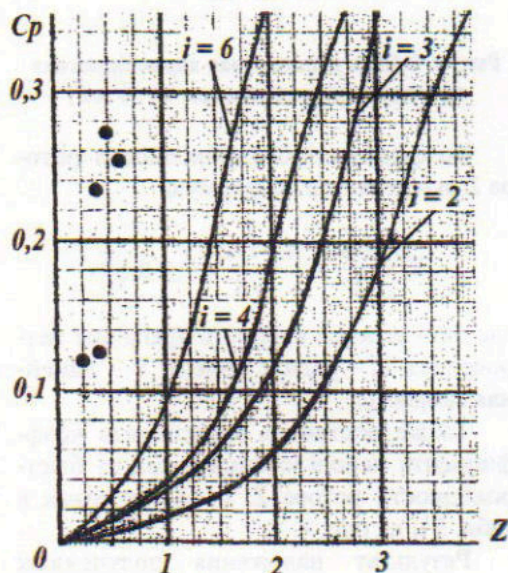


Рис. 5. Зависимости  $C_p$  ветроустановок с различным числом лопастей и значения  $C_p$ , полученные в результате исследований

Таблица 6. Мощность ВЭУ в зависимости от скорости ветра

$V$ , м/с	2	3	4	5	6
$N$ , кВт	0,0026	0,0088	0,02	0,04	0,07



Рис. 6. Расчетная мощностная характеристика исследуемой ветроустановки при  $C_p = 0,3$

Видно, что данная ветроустановка не попадает ни на одну характеристику, более того, имеет маленькую быстроходность, но в исследуемом диапазоне скоростей ее  $C_p$  в 2-3 раза выше, чем у пропеллерных ветроустановок.

Мощность ветроустановки определяется по формуле

$$N = C_p \cdot D^2 \cdot \frac{V^3}{2080},$$

где  $C_p = 0,3$ ;  $D$  – диаметр ветроколеса.

В табл. 6 представлены данные по расчету мощности.

На рис. 6 представлена мощностная характеристика исследуемой роторной ветроустановки.

Расчет энергоснабжения в зависимости от скорости ветра. Ниже приведен расчет выработки электроэнергии в реальных условиях станции при реальных скоростях ветра в исследуемый летний период.

Энерговыворотка одной ВЭУ за период времени  $T$  вычисляется по формуле

$$E = T \cdot K_T \cdot K_M \sum_{i=1}^n N(V_i) \Pi_i,$$

где  $E$  – объем выработки электрической энергии за время  $T$ , кВт·ч;  $K_T$  – коэффициент технической готовности,  $K_T = 0,96 \div 0,98$ ;  $K_M$  – простой по обледенению,  $K_M = 0,96 \div 0,98$ ;  $N$  – мощность ветра при скорости ВЭУ  $i$ -ой градации;  $\Pi_i$  – повторяемость скорости ветра  $i$ -ой градации за время  $T$  (табл. 7);

$T$  – число часов ВЭУ в год с учетом коэффициента готовности и простоя по обледенению.

Число часов работы ВЭУ с учётом коэффициентов технической готовности и простоя по обледенению

$$T_G = 8760 \cdot K_G \cdot K_M = 8413 \text{ ч.}$$

Выработка энергии по одной градации скорости ветра

$$E_i = T_G \cdot \Pi_i \cdot N_i.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 8.

Таблица 7. Вероятность скорости ветра по градациям (% от общего числа случаев) [2]

V, м/с	2	3	4	5	6
$\Pi_i$ , %	31	29	24	13	3

Таблица 8. Результаты расчета энерговыработки по градациям скорости ветра

V, м/с	2	3	4	5	6
N, кВт	0,0026	0,0088	0,02	0,04	0,07
$\Pi_i$ , %	0,31	0,29	0,24	0,13	0,03
$E_i$ , кВт·ч	6,8	21,5	40,4	43,8	17,7

Тогда объем энерговыработки за год будет равен

$$E_G = \sum_{i=1}^n E_i.$$

$$E_G = 6,8 + 21,5 + 40,4 + 43,8 + 17,7 = 130,2 \text{ кВт·ч.}$$

А годовой объем производства электрической энергии с  $1 \text{ м}^2$  составляет:

$$N_{уд} = \frac{E_G}{\pi D^2} = \frac{130,2}{3,14 \cdot 1,5^2} = 73,6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2}$$

Безусловно, в зимний период, когда скорости ветра возрастают, этот показатель значительно вырастет, возможно, пропорционально  $V^3$ , и, предположительно, пропорционально  $C_p$ , значение которого также возможно возрастет, од-

нако, это заслуживает дополнительного исследования.

**Выводы.** Исследована роторная ветроустановка с винтовыми лопастями, получена ее мощностная характеристика, рассчитаны энергетические показатели в летнее время. В результате ветроустановка вырабатывает при ветре 6 м/с максимально 70 Вт·ч, что равно годовой выработке в 130,2 кВт·ч. Ветер скоростью 6 м/с имеет 3% повторяемости от общего количества ветров на данной местности.

По полученным результатам можно судить, что мощности данной установки недостаточно для того, чтобы вносить весомый вклад в дополнительную выработку электроэнергии солнечной станции в летнее время. Подобного типа установки применимы для использования на крышах домов бытовых потребителей и, возможно, для промышленного использования в определенных условиях, когда вопросы применимости будут определяться ценовой политикой в области производства установок и стоимости электроэнергии.

Малая выработка ВЭУ в летнее время позволяет незначительно догрузить инверторы, сети, подстанции, а малая выработка солнечной энергии зимой, можно ожидать, догрузит инверторы и прочее оборудование выработкой ВЭУ. Т.е. комплексное использование ВЭУ и солнечной станции приведет к очевидным преимуществам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Описание и технические характеристики генераторной установки ветряка производства ООО «Любимый берег». URL: <http://alandbi.ru/> (дата обращения: 18.03.2016).

2. СТО "Ветроэлектростанции. Условия создания. Нормы и требования" от 31.08.2009 № 70238424.27.100.059-2009 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2009.

#### EXPERIMENTAL RESEARCH OF A ROTARY WIND TURBINE WITH VANES IN SOLAR POWER STATION "ENERGYSEVASTOPOL"

V.A. Safonov, N.I. Varvinskaya, N.S. Mamontov, A.A. Voskanyan

Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University»  
Russian Federation, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The article presents the research results of an experimental rotary wind turbine with helical vanes installed in the Ltd. "Energy Sevastopol" station, it is investigated its power characteristics and calculated the energy performance.

**Keywords:** power windmill, current-voltage and power characteristics, power generation.