

---

doi: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.02.121>  
УДК 004.942:621.548:620.928

**В.С. Подгуренко<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **О.М. Гетманец<sup>2</sup>**, канд. физ.-мат. наук,  
**В.Е. Терехов<sup>1</sup>**, аспирант

<sup>1</sup> Институт проблем моделирования в энергетике  
им. Г.Е. Пухова НАН Украины  
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,  
e-mail: [vspodgurenko@gmail.com](mailto:vspodgurenko@gmail.com), [vl.terekhov86@gmail.com](mailto:vl.terekhov86@gmail.com));

<sup>2</sup> Национальный университет им. В.Н. Каразина  
(Украина, 61000, Харьков, пл. Свободы, 4,  
e-mail: [getmanets54@gmail.com](mailto:getmanets54@gmail.com))

## **Повышение эффективности производства электроэнергии ветроэлектрической установкой на основе математического моделирования**

Определены наиболее важные факторы, влияющие на эффективность работы ветроэлектрических установок. На основании данных многолетних измерений скоростей ветра в приземном слое атмосферы на территории ветропарков Северного Причерноморья определена зависимость изменения скорости ветра от высоты. Результаты полученных измерений положены в основу математической модели оптимального производства электроэнергии.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* ветроэлектрическая установка, ветроэлектростанция, математическая модель, зависимость Hellman, эффективность.

В настоящее время при строительстве промышленных ветроэлектростанций (ВЭС) на территории Северного Причерноморья актуальной задачей является выбор ветроэлектрической установки (ВЭУ), удовлетворяющей соотношению цена-качество и вырабатывающей наибольшее количество товарной энергии. Существующая мировая тенденция при выборе ВЭУ, когда предпочтение (при прочих равных условиях) отдается ВЭУ с наибольшей номинальной мощностью, оказалась ошибочной. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что использование этого показателя может привести к увеличению стоимости вырабатываемой электроэнергии.

© Подгуренко В.С., Гетманец О.М., Терехов В.Е., 2020

**Постановка задачи.** Важной задачей является разработка математической модели, позволяющей на стадии выбора места строительства промышленной ВЭС определить оптимальные параметры ВЭУ, гарантирующие получение максимальной выработки электроэнергии. Из множества влияющих факторов основными при разработке математической модели выбраны диаметр ветроколеса, высота его расположения и номинальная мощность ВЭУ.

**Прогнозирование выработки электроэнергии для ВЭУ большой мощности.** Выбор объекта исследований объясняется возможностью использования экспериментальных данных Аджигольской пилотной ВЭС, территория которой непосредственно прилегает к ветропарку Очаковской. Были использованы результаты многолетних исследований ветровой нагрузки на территории Аджигольской ВЭС.

За 18 лет эксплуатации ВЭС исследовано вероятностное распределение ветра по градациям скоростей. Регулярные замеры проводились на репрезентативной метеостанции военного аэродрома. Для повышения достоверности эксперимента указанные замеры дублировались непосредственно на Аджигольской ВЭС прибором Logger #9200 на высоте 27,0—31,5 м и одновременно на высоте 10,0—31,5 м [1, 2]. Средняя скорость ветра за указанный период на высоте флюгера  $h_{\phi} = 31,5$  м составляет 6,0 м/с. Эта скорость является наименьшей при расчете разными методами, что обеспечивает наиболее достоверный прогноз на длительный период работы ВЭУ.

В условиях ветропотенциала Аджигольской ВЭС определена выработка энергии 43-х ВЭУ ведущих зарубежных производителей с учетом зависимости электрической мощности ветротурбин от скорости ветра на оси ветроколеса. Для расчета объемов производства электроэнергии различными ВЭУ пересчитаны градации скоростей ветра с высоты флюгера  $h_{\phi}$  на высоты осей ветроколеса  $h_0$  исследуемых ВЭУ. Для пересчетов скоростей ветра с одной высоты на другую использовали известную зависимость Hellman [3]

$$\frac{V_0}{V_{\phi}} = \left( \frac{h_0}{h_{\phi}} \right)^m, \quad (1)$$

где  $V_{\phi}$  — скорость ветра на высоте флюгера  $h_{\phi} = 31,5$  м;  $V_0$  — искомая скорость ветра на высоте  $h_0$  оси ветроколеса;  $m$  — показатель степени функции, так называемый коэффициент вертикального профиля скорости ветра. Как показали специальные испытания [1], для ветра на Аджигольской ВЭС коэффициент вертикального профиля скорости ветра в среднем составляет  $m = 0,227$ .

Преобразовав формулу (1) к виду

$$V_0 = V_\Phi \left( \frac{h_0}{h_\Phi} \right)^m = V_\Phi \left( \frac{h_0}{31,5} \right)^{0,227}, \quad (2)$$

определим скорость ветра на оси ветроколеса исследуемых ВЭУ. Используя формулу (2), трансформируем данные [1] распределения скоростей ветра на площадке Аджигольской ВЭС на высоте  $h_\Phi = 31,5$  м на годовое распределение повторяемости скоростей ветра на различных высотах осей  $h_0$  ветроколес исследуемых ВЭУ.

Расчет годовой потенциальной выработки электроэнергии  $Q_n$  выполняем по формуле

$$Q_n = \sum P_i T_i, \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Здесь  $P_i$  — генерируемая мощность при скорости ветра  $V_i$  на оси ветроколеса (кВт) (по мощностным характеристикам ВЭУ);  $T_i$  — длительность периода работы при скорости ветра  $V_i$ , где  $i$  — градация. Таким образом, за год  $T_i = 365 \text{ дн} \times 24 \text{ ч} = 8760 \text{ ч}$ .

В результате численного моделирования получены прогнозируемые величины выработки электроэнергии 43-х ВЭУ большой мощности при ветровых условиях промышленной площадки ветропарка Очаковский.

Важнейшей особенностью полученных показателей является использование фактических многолетних замеров реальных скоростей ветра и распределения их вероятностей по градациям на площадке Аджигольской ВЭС [1]. Именно в этом заключается их главное отличие от гипотетических данных, используемых различными исследователями. Поэтому указанные количественные показатели заложены в основу компьютерного моделирования.

В результате анализа числовых результатов установлена многофакторная зависимость ожидаемой расчетной выработки электроэнергии каждой конкретной ВЭУ. В результате расчетов впервые установлено, что, например, некоторые ветротурбины с меньшей номинальной мощностью производят большее количество электрической энергии, чем турбины с большей номинальной мощностью. Отсюда следует, что если при выборе ВЭУ ориентироваться только на показатель ее номинальной мощности, то это может привести к увеличению капитальных затрат и повышению стоимости вырабатываемой электроэнергии.

**Математическая модель годового производства электроэнергии.** Разработка математической модели производства электроэнергии ВЭУ с учетом влияния указанных факторов позволит целенаправленно выбирать на мировом рынке или проектировать наиболее эффективные ВЭУ

в соответствии с ветровыми условиями конкретного места строительства ВЭС.

На основании корреляционных исследований стохастического влияния [4—6] на годовую выработку ВЭУ в сочетании с регрессионным исследованием разработана математическая модель выработки  $Q_M$  (МВт·ч) с учетом следующих факторов:  $X_1$  — номинальная мощность генератора, МВт;  $X_2$  — диаметр ветроколеса, м;  $X_3$  — высота расположения оси ветроколеса, м.

Полученная модель имеет высокий коэффициент множественной корреляции  $R = 0,9939$  переменной  $Q_M$  со всеми факторами; высокий коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9870$  (нормированный на число факторов модели); относительно небольшую стандартную ошибку (272,09 МВт·ч). Модель значима в целом по Фишеру ( $P_F < 2,04 \cdot 10^{-37}$ ). Уровень значимости коэффициентов при объясняющих факторах по Стьюденту [7] крайне мал. Относительные ошибки коэффициентов регрессии не превышают 9,53 %, т.е. модель не имеет видимых недостатков.

Полученную математическую модель представим в виде

$$Q_M = 7126,25 + 1348,594X_1 + 97,52617X_2 + 28,81139X_3. \quad (3)$$

Суть данной модели в следующем: повышение мощности ВЭУ на 1 МВт обеспечивает возрастание годовой выработки турбины на 1348,594 МВт · ч; увеличение диаметра ветроколеса на 1 м ведет к повышению годовой выработки на 97,526 МВт · ч; увеличение высоты оси ветроколеса на 1 м ведет к возрастанию годовой выработки на 28,811 МВт · ч.

**Сопоставление модельных исследований с фактическими результатами эксплуатации.** Достоверность и допустимость принятых параметров при разработке любой динамической модели реальной системы может быть проверена и оценена лишь посредством сопоставления результатов теоретических исследований с экспериментальными данными. Промышленная эксплуатация первых ВЭС в ветровых условиях Украины дала богатый фактический материал. Сопоставляя результаты теоретических исследований и фактические данные эксплуатации, проверяем адекватность разработанной модели.

Используя (3), оценим возможную годовую выработку электроэнергии на Дмитриевском ветрополе Очаковского ветропарка, укомплектованного ВЭУ FL 2,5—100 с такими параметрами: номинальная мощность генератора  $X_1 = 2,5$  МВт; диаметр ветроколеса  $X_2 = 100$  м; высота расположения оси  $X_3 = 100$  м. Рассчитаны с помощью модели следующие параметры:  $Q_M = 8879$  МВт · ч, расчетный коэффициент использования установленной мощности (КИУМ)  $K_M = 40,5\%$ .

**Выработка электроэнергии Дмитриевским ветрополем Очаковского ветропарка**

Год эксплуатации	$Q_э$ , МВт · ч	$K_э$ , %	$Q_м > Q_э$ , %	$K_т$	$Q'_м$	$Q'_м > Q_э$ , %
2013	7828	35,7	11,8	0,959	8515	8,1
2014	7316	33,4	17,6	0,890	7902	7,4
2015	7275	33,2	18,1	0,961	8583	14,7
2016	7696	35,1	13,3	0,941	8355	7,9
2017	7900	36,1	11,0	0,921	8176	3,4
За пять лет	7603	34,7	14,4	0,934	8296	8,4

В таблице приведены значения фактической годовой выработки электроэнергии  $Q_э$  и фактические значения КИУМ  $K_э$  [8, 9], а также результаты сопоставления модельной выработки  $Q_м$  с фактической эксплуатационной  $Q_э$ . Кроме того, указаны значения коэффициента технического использования (КТИ)  $K_т$ , пересчитанные с его учетом значения модельной выработки  $Q'_м$  и результаты их сопоставления с фактическими значениями  $Q_э$ .

Поскольку при эксплуатации ВЭУ неизбежны простои по различным причинам, ежегодные значения  $Q_э$  меньше значений  $Q_м$  минимум на 11% и максимум на 18% (среднее значение за пять лет — 14,4%). С учетом фактических значений КТИ  $K_т$  эти соотношения составляют от 3,4% до 14,7% (среднее за пять лет — 8,4%), что является вполне достоверным результатом. Сопоставление результатов теоретических исследований и результатов промышленной эксплуатации свидетельствует о достоверности разработанной математической модели.

Важной особенностью математической модели является тот факт, что при ее использовании не требуются дополнительные непосредственные измерения различных параметров, в частности не требуется обработка метеоданных по репрезентативным метеостанциям, что способствует существенному упрощению расчетов и значительному уменьшению их погрешностей. Разработка данной модели основана на фактических многолетних измерениях автоматизированной системой Logger (США) скоростей ветра на пилотной Аджигольской ВЭС и использовании фактического степенного показателя изменения скорости ветра по высоте, что значительно увеличило достоверность расчетов.

**Выводы**

Предложенная математическая модель производства электроэнергии ВЭУ позволяет быстро и достоверно определить ее оптимальные параметры в зависимости от ветровой нагрузки территории, на которой предполагается строительство ВЭС. Такой подход определяет практические достоинства работы, так как на стадии технического проекта дает возможность осуществлять выбор ВЭУ с оптимальными технико-экономическими характеристиками.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Подгуренко В.С.* Технико-аналитическое предложение по строительству промышленной ВЭС в прибрежной зоне Очаковского района. НТО № АВЭС-600.Б.0000.09.Т01 / В.С. Подгуренко, В.Н. Бордюгов. Николаев: ЮГ ПВЦ НИЭ «Бояр», 2009, 114 с.
2. *Подгуренко В.С.* Прединвестиционные расчеты эффективности строительства промышленной ветровой электростанции на площадках, примыкающих к Адзигольской ВЭС в Николаевской области. Подбор эффективных ветроэлектрических установок для комплектации промышленных ВЭС. НТО инв. №АВЭС-600.Б.0000.09.Т02/01 /В.С. Подгуренко, Е.В. Петров. Николаев: ЮГ ПВЦ НИЭ «Бояр», 2010, 69 с.
3. *Техническая энциклопедия.* Т. 3. Второе изд., испр. и доп. М.: ОНТИ НК ТП СССР, 1937, с. 702.
4. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман // 10-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2004, 479 с.
5. *Кремер Н.Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика / Н.Ш. Кремер // 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ — ДАНА, 2004, 573с.
6. *Львовский Е.Н.* Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский // 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1988, 239 с.
7. *Барановський Д.І.* Біометрія в програмному середовищі MS Excel / Д.І. Барановський, О.М. Гетманець, А.М. Хохлов // Харків: СПД ФО Бровін О.В, 2017, 90с.
8. *Podgurenko V.* Operation results of industrial wind power station of the Northern Black Sea Coast in recent five years / V. Podgurenko // Hit summer school of energy 2017. Chance and Challenge. Harbin, China, 2017, p. 1—6.
9. *Подгуренко В.С.* Внедрение прогрессивных технологий строительства мощных ветроэлектростанций Северного Причерноморья на базе ветротурбин мегаваттного класса / В.С. Подгуренко, М.В. Ефимов, Н.П. Круглов, Ю.Г. Куцан // Новини енергетики, 2014, № 10, с. 6—12.

Получена 12.02.20

#### REFERENCES

1. Podgurenko, V.S. and Bordyugov, V.N. (2009), *Tekhniko-analiticheskoye predlozheniye po stroitel'stvu promyshlennoy VES v pribrezhnoy zone Ochakovskogo rayona* [Technical and analytical proposal for the construction of an industrial wind farm in the coastal zone of Ochakov district], YUG PVTS NIE «Boyar», Nikolaev, Ukraine.
2. Podgurenko, V.S. and Petrov, E.V. (2010), *Predinvestitsionnyye raschety effektivnosti stroitel'stva promyshlennoy vetrovoy elektrostantsii na ploshchadkakh, primykayushchikh k Adzhigol'skoy VES v Nikolayevskoy oblasti. Podbor effektivnykh vetroelektricheskikh ustanovok dlya komplektatsii promyshlennykh VES* [Pre-investment calculations of the effectiveness of the construction of an industrial wind farm at sites adjacent to the Adzhigol wind farm in the Nikolaev region. Selection of effective wind power plants for the assembly of industrial wind farms], YUG PVTS NIE «Boyar», Nikolaev, Ukraine.
3. (1937), *Tekhnicheskaya entsiklopediya. T. 3. Vtoroye izd., ispr. i dop.* [Technical encyclopedia. Volume 3. Second ed., rev. and add.], ONTI NK TP, Moscow, USSR.
4. Gmurman, V.E. (2004), *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika 10-e izdaniye* [Probability Theory and Mathematical Statistics. 10th ed], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
5. Kremer, N.Sh. (2004), *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika 2-ye izd* [Probability Theory and Mathematical Statistics. 2nd ed], UNITY - DANA, Moscow, Russia.
6. Lvovsky, E.N. (1988), *Statisticheskiye metody postroyeniya empiricheskikh formul 2-ye izd* [Statistical methods for constructing empirical. 2nd ed], Vysshaya shkola, Moscow, USSR.

7. Baranovsky, D.I., Getmanets, O.M. and Khokhlov, A.M. (2017), *Biometriya v prohranomu seredovyshchi MS Excel* [Biometry in MS Excel software], SPD FO Brovin O.V, Kharkiv, Ukraine.
8. Podgurenko, V. (2017), Operation results of industrial wind power station of the Northern Black Sea Coast in recent five years, Harbin, China.
9. Podgurenko, V.S., Yefimov, M.V., Kruglov, N.P. and Kutsan, Yu.G. (2014), “The implementation of advanced technologies for the construction of powerful wind farms in the Northern Black Sea region based on megawatt-class wind turbines”, *Novyny Enerhetiki*, no. 10, pp. 6-12.

Received 12.02.20

*V.S. Подгуренко, О.М. Гетманець, В.С. Терехов*

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ  
НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Визначено найбільш важливі фактори, що впливають на ефективність роботи вітроелектричних установок. За даними багаторічних вимірювань швидкостей вітру в приземному шарі атмосфери на території вітропарків Північного Причорномор'я визначено залежність зміни швидкості вітру від висоти. Результати отриманих вимірювань покладено в основу математичної моделі оптимального виробництва електроенергії.

*К л ю ч о в і с л о в а: вітроелектрична установка, вітроелектростанція, математична модель, залежність Hellman, ефективність.*

*V.S. Podhurenko, O.M. Getmanets, V.E. Terekhov*

MATHEMATICAL MODEL OF WIND TURBINE ELECTRICITY  
PRODUCTION AS A METHOD OF INCREASING ITS EFFICIENCY

The most influential factors on the efficiency of wind turbines are determined. Based on the data of long-term measurements of wind speed in the surface layer of the atmosphere in the wind farms territory of the Northern Black Sea Region the dependence of the wind speed change with height is determined. The obtained results were used for an optimal electricity production mathematical model development.

*K e y w o r d s: wind turbine, wind farm, mathematical model, Hellman dependence, efficiency.*

*ПОДГУРЕНКО Владимир Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, докторант Института проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1964 г. окончил Николаевский кораблестроительный институт. Область научных исследований — ветроэнергетика.*

*ГЕТМАНЕЦЬ Олег Михайлович, канд. физ.-мат. наук, доцент Национального университета им. В.Н. Каразина. В 1977 г. окончил Харьковский государственный университет им. М. Горького. Область научных исследований — математическое моделирование.*

*ТЕРЕХОВ Владимир Евгеньевич, аспирант Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 2010 г. окончил Национальный университет кораблестроения (г. Николаев). Область научных исследований — ветроэнергетика.*