

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНО- И ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОГРАНИЧЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ ВЕТРОПАРКА

А.А. Козин

Произведено сравнение работы групп ветроустановок, состоящих из вертикально-осевых и горизонтально-осевых ВЭУ равной мощности, имеющих примерно равные ометаемые площади. Оценена эффективность использования земельных площадей, отводимых под строительство группы вертикально-осевых ВЭУ, а также группы горизонтально-осевых ВЭУ. Рассчитаны величины потенциально возможной мощности горизонтально-осевых и вертикально-осевых ВЭУ в зависимости от скорости ветрового потока. Произведено сравнение полезной суммарной мощности для рассматриваемых типов ВЭУ, установленных на площади 1 км², в зависимости от скорости ветрового потока. Сделан расчёт полезной мощности ВЭУ с учётом реальных ветровых условий. На основании произведенных расчётов, а также с учётом возможных решений по оптимизации размещения ВЭУ, сделаны выводы о наиболее эффективном типе ВЭУ для применения на рассматриваемой территории.

Ключевые слова: ветроэнергетическая станция, выработка ВЭУ электрической энергии, ВЭУ в составе ВЭС.

Введение

Наибольшее распространение среди ветроэнергетических установок (ВЭУ) получили установки с горизонтально-осевым [1] (ГО ВЭУ) и вертикально-осевым (ВО ВЭУ) [2] приводом ветроколеса, причем каждый из этих классов ВЭУ имеет свои достоинства и недостатки [3]. Применительно к Уральскому региону часто приходится сталкиваться с ограниченностью территории ветропарка [4], что неизбежно влечет за собой необходимость рационального выбора типа ВЭУ с целью обеспечения максимальной эффективности работы группы ветроустановок. В частности, примером такой «ограниченной» территории может служить база отдыха ЮУрГУ, расположенная в поселке Непряхино Челябинской области, которая в рамках проводимых на кафедре электротехники и возобновляемых источников энергии ЮУрГУ исследований рассматривается в качестве перспективного полигона для создания ветроэнергетической станции (ВЭС) на базе группы ВЭУ. Для этого в данной местности были проанализированы скорости ветра и частота его возникновения [5]. Результаты исследований однозначно указывают на целесообразность размещения ветроустановок на территории поселка Непряхино.

Однако для окончательного решения вопроса о выборе типа ВЭУ необходим сравнительный анализ эффективности установок с вертикально-осевым и горизонтально-осевым расположением ветроколеса по критерию их энергетической эффективности на ограниченных площадях ветропарка.

Теоретическая часть

При проведении теоретических исследований в качестве базовых были выбраны ВО ВЭУ производства ГРЦ «Вертикаль» [6] и ГО ВЭУ совместной разработки ГРЦ и кафедры электротехники и возобновляемых источников энергии ЮУрГУ, имеющие примерно идентичные характеристики (см. таблицу). При расчетах расстояние между соседними ВЭУ принималось равным 10 м [7–10]. Распределение ветра по всем направлениям на территории ветропарка считалось равномерным.

Тогда в соответствии с выражением [11]:

$$N = \left(\frac{1000}{n \cdot D} \right)^2 \quad (1)$$

в случае расположения ВЭУ в узлах квадратной сетки со стороной квадрата $n \cdot D$ на 1 км² земельной площади можно разместить $N=865$ единиц ВО

Технические характеристики ВЭУ

Тип ВЭУ	Мощность, кВт	Ометаемая площадь, м ²	Диаметр D ветроколеса, м
ВО ВЭУ производства ГРЦ «Вертикаль»	3,0	12,92	3,4
ГО ВЭУ производства ГРЦ «Вертикаль» и кафедры ЭВИЭ ЮУрГУ		12,8	4,0

ВЭУ и $N=625$ единиц ГО ВЭУ. Здесь n – расстояние между соседними ВЭУ.

Если ВЭУ располагать в узлах правильной треугольной сетки со сторонами треугольника $n \cdot D$, то согласно

$$N = 2 / \sqrt{3 \cdot \left(\frac{1000}{n \cdot D}\right)^2}, \quad (2)$$

на 1 км^2 земельной площади можно разместить 999 единиц ВО ВЭУ и 721 ГО ВЭУ.

Таким образом, использование ВО ВЭУ позволяет эффективнее использовать земельные площади, отводимые под строительство группы ветроустановок, чем в случае применения ГО ВЭУ.

Однако основным критерием эффективности работы группы ветроустановок все же является отдаваемая мощность, которую они могут обеспечить для электроснабжения потребителей. Для того, чтобы оценить энергетическую эффективность работы группы ВО ВЭУ и группы ГО ВЭУ, состоящих из ВЭУ мощностью 3 кВт, рассчитаем потенциально возможную мощность (номинальная мощность ВЭУ при максимально допустимом (номинальном) ветровом потоке) ГО ВЭУ по известной формуле для ВЭУ пропеллерного типа [12]:

$$P_{ВЭУ} = \pi \left(\frac{1}{2}D\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \rho V^3 \cdot \xi(V) \cdot \eta_{ред}(V) \cdot \eta_{ген}(V), \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха (принимается равной $1,2041 \text{ кг/м}^3$), ξ – максимально возможный коэффициент использования удельной мощности ветрового потока ветроколесом ВЭУ (равен 0,42-0,46 для ГО ВЭУ [7, 8, 13] и 0,43 для ВО ВЭУ производства ГРЦ «Вертикаль»), $\eta_{ред}$ – КПД редуктора, $\eta_{ген}$ – КПД генератора равно (величины $\eta_{ред}$ и $\eta_{ген}$ в диапазоне скоростей ветра от 5 м/с до 25 м/с зависят слабо от скорости ветра V , поэтому принимаем

их постоянными величинами $\eta_{ред}=0,9$, $\eta_{ген}=0,95$). Таким образом, получаем характеристики, приведенные на рис. 1.

С учетом полученных потенциально возможной мощности $P_{ВЭУ}$ и максимально допустимой плотности размещения ВЭУ в составе ветроэнергетической станции (ВЭС), максимальная полезная суммарная мощность, развиваемая ВЭУ, установленными на площади 1 км^2 определяется из соотношения [14]:

$$P_{ВЭС} = 0,91 \cdot \left(\frac{1000}{n}\right)^2 P_{ВЭУ}. \quad (4)$$

Таким образом, получаем характеристики, представленные на рис. 2.

Следовательно, удельная мощность группы ВО ВЭУ при среднегодовых скоростях ветра на рассматриваемой территории больше удельной мощности группы ГО ВЭУ.

С учетом реальных ветровых условий, развиваемая ВЭУ мощность $P_{ВЭУ}$ имеет вид:

$$P_{ВЭУ} = \pi \left(\frac{1}{2}D\right)^2 \times \int_{V_0}^{V_{БВР}} \frac{1}{2} \rho V^3 \cdot f(V) \cdot \xi(V) \cdot \eta_{ред} \cdot \eta_{ген} dV, \quad (5)$$

где $\frac{1}{2} \rho V^3$ – удельная мощность ветрового потока с плотностью воздуха ρ и скоростью V , $\eta_{ред}$ и $\eta_{ген}$ – КПД редуктора и генератора ВЭУ соответственно; $\xi(V)$ – реальный, практически достигаемый современными ВЭУ коэффициент использования удельной мощности ветрового потока с плотностью воздуха ρ и скоростью V .

При этом величина $\xi(V)$ более существенно, а $\eta_{ред}$ и $\eta_{ген}$ менее существенно зависят от скорости ветра V и нагрузки. Для упрощения расчета примем для ВО ВЭУ $\xi(V) = 0,43$; для ГО ВЭУ

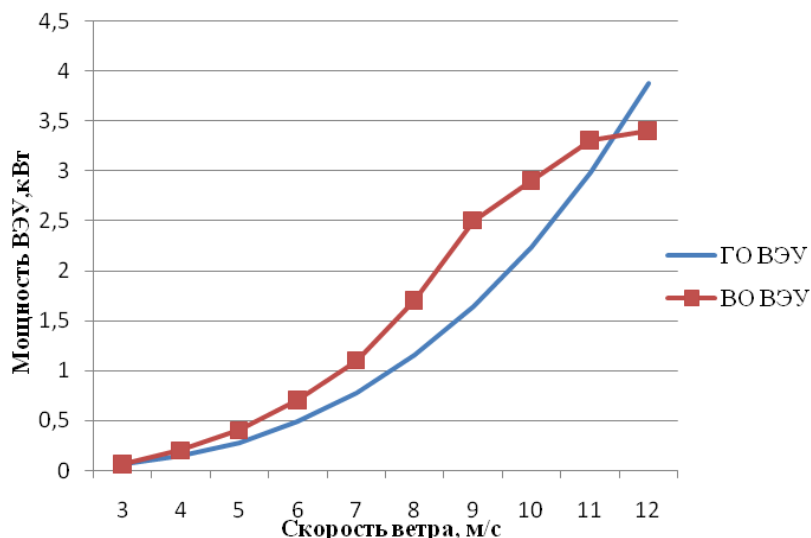


Рис. 1. Сравнение потенциально возможных мощностей для вертикально- и горизонтально-осевых ветроэнергетических установок мощностью 3 кВт

Альтернативные источники энергии

$\xi(V) = 0,44$.

Таким образом, для ГО ВЭУ $P_{ВЭУ} = 300 \text{ Вт/м}^2$, для ВО ВЭУ $P_{ВЭУ} = 217 \text{ Вт/м}^2$.

Учет реальных ветровых условий может быть проведен с использованием какого-либо аналитического распределения $f(V)$, из которых наиболее простым и наглядным для анализа представляется распределение Максвелла [15]:

$$f(V) = (0,5 \cdot V \cdot \pi) / V_{cp}^2 \cdot \exp\left\{0,25 \cdot \pi \cdot (V/V_{cp})^2\right\}. \quad (6)$$

В рамках выбранных моделей оценки реально возможных значений полезной мощности $P_{ВЭУ}$ современных ВЭУ сводятся к параметрическим расчетам при разных значениях V_{cp} в распределении $f(V)$.

Используя данные среднегодовых скоростей ветра для рассматриваемой местности, примем $V_{cp} = 3,7 \text{ м/с}$. Таким образом, распределение Максвелла $f(V)$ в диапазоне скоростей ветра от 0 м/с до 15 м/с имеет следующий вид, показанный на рис. 3.

Полученные результаты говорят о том, что удельная мощность ВЭУ $P_{ВЭУ}(V)$ с заданной ско-

ростью регулирования V_p монотонно растет с ростом средней скорости ветра V_{cp} , достигает максимума $P_{max}(V)$ примерно при значениях аргумента $V_{cp} \approx V_p$ и при дальнейшем росте V_{cp} при $V_{cp} > V_p$ медленно убывает.

С учетом полученных с использованием (5) результатов, максимальная суммарная мощность, развиваемая установленными на площади 1 км^2 современными ВЭУ при скоростях ветра порядка скоростей их регулирования и при максимально допустимой плотности их размещения в составе ВЭС, определяемой выражениями (1) и (2), по выражению (4) составляет:

- для ГО ВЭУ: $P_{ВЭС} = 2,7 \text{ МВт/км}^2$;
- для ВО ВЭУ: $P_{ВЭС} = 1,9 \text{ МВт/км}^2$.

Однако учитывая то обстоятельство, что на одинаковом по площади участке территории вертикально-осевых установок в составе ВЭС можно разместить примерно в два раза больше (рис. 4) (за счет размещения ветроколеса на мачтах различной высоты и сокращения расстояния между соседними ВЭУ), то и удельный показатель съема энергии

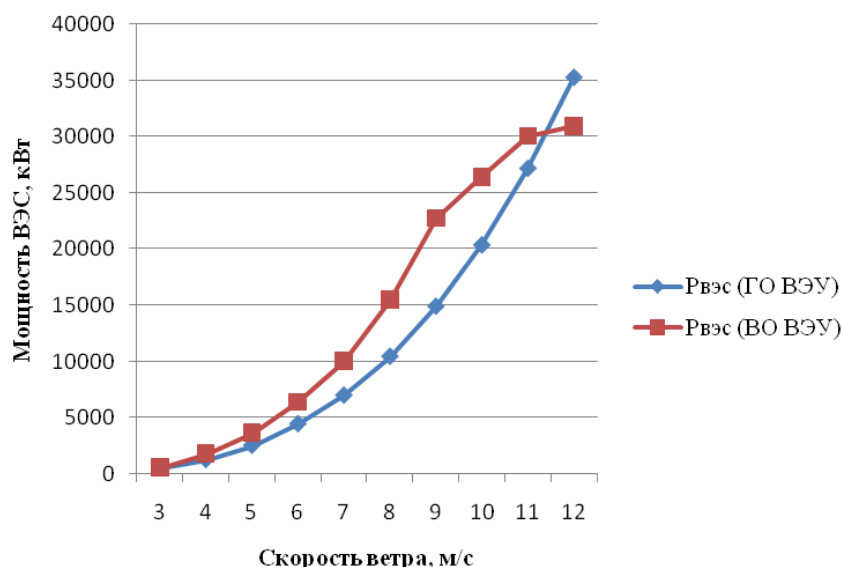


Рис. 2. Сравнение $P_{ВЭС}$ для вертикально- и горизонтально-осевых ветроэнергетических установок

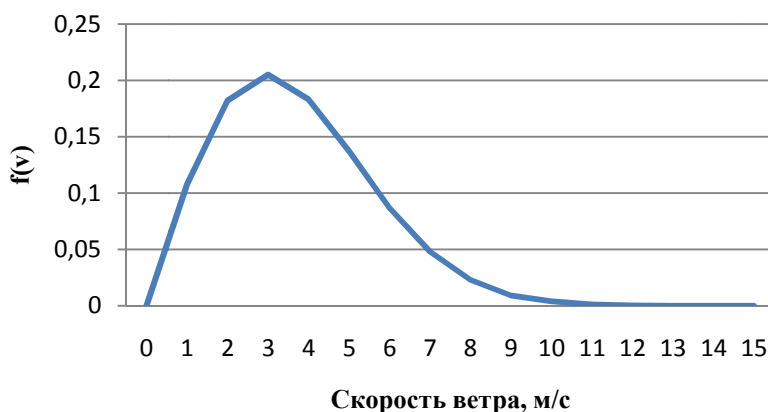


Рис. 3. Распределение скоростей ветра $f(V)$ в пос. Непряхино

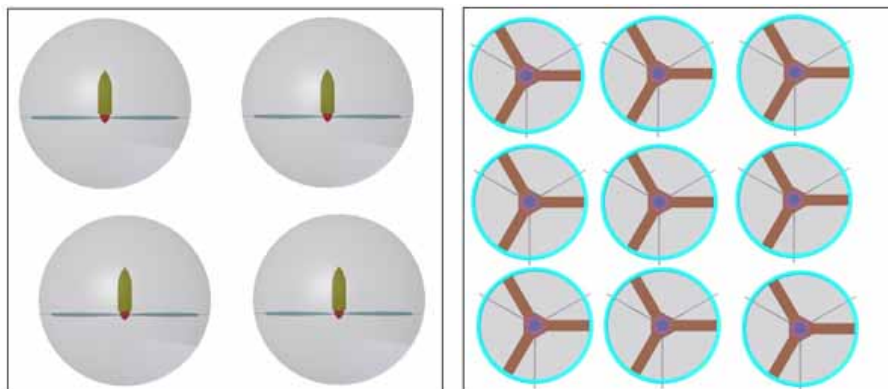


Рис. 4. Горизонтально- и вертикально-осевые ветроэнергетические установки в составе ветропарка

с 1 м^2 также увеличится.

Следовательно суммарная выработка ВО ВЭУ на 1 км^2 в составе ВЭС при $n = 5$ диаметрам ветроколеса составляет $P_{\text{ВЭС}} = 7,9 \text{ МВт/км}^2$.

Выводы

1. При размещении ВЭУ на мачтах разной высоты, группа ветроустановок, состоящая из ВО ВЭУ на ограниченной территории при меньшей скорости ветра сможет обеспечить в три раза большую, нежели при использовании ГО ВЭУ, мощность для электроснабжения потребителей, что является необходимым критерием для работы ВЭС на территории Южного Урала.

2. Применение ВО ВЭУ позволяет получать электрическую энергию даже при малых скоростях ветра (3–5 м/с), преобладающих на рассматриваемой территории Южного Урала, в то время, как ГО ВЭУ обеспечивают требуемую мощность только при номинальном значении скорости ветрового потока.

Литература

1. Шефтер, Я.И. Ветроэнергетические агрегаты / Я.И. Шефтер. – М.: Машиностроение, 1972 – С. 49.

2. Gasch, R. Wind Power Plants. Fundamentals, Design, Construction and Operation / R. Gasch, J. Twele. – Berlin: Solarpraxis; London: James&James, 2002. – С. 73.

3. Manwell, J.F. Wind Energy Explained: Theory, Design, and Application / J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers. – England: John Wiley & Sons Ltd, 2000. – С. 94.

4. Ганага, С.В. Современные возможности поиска и технико-экономического обоснования оптимальных вариантов энергоснабжения на базе традиционных и возобновляемых источников энергии / С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов, В.Г. Николаев // Труды первого международного форума «Энергия будущего». – М., 2004. – С. 33.

5. Козин, А.А. Факторы, определяющие работу группы ветроустановок на ограниченной территории / А.А. Козин // Вестник ЮУрГУ. Се-

рия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 133–134.

6. Соломин, Е.В. Информация / Е.В. Соломин // ГРЦ-Вертикаль. – www.src-vertical.com. – С. 1.

7. Ресурсы и эффективность использования ВИЭ в России / П.П. Безруких, Ю.Д. Арбузов, Г.А. Борисов и др. – СПб.: Наука. 2002. – С. 33.

8. Зубарев, В.В. Использование энергии ветра в районах Севера / В.В. Зубарев, В.А. Минин, И.Р. Степанов. – Л.: Наука. 1989. – С. 53.

9. Фатеев, Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев. – ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. – С. 79.

10. Энергия ветра. Оценка технологического и экономического потенциала / Л. Ярас, Л. Хоффман, А. Ярас, Г. Обермайер. – М.: Мир, 1982. – С. 102.

11. Николаев, В.Г. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения / В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов. – М.: Атмограф, 2008. – С. 197.

12. Wind Power Technology. EWEA. 2004 – С. 12.

13. Концепция использования ветровой энергии в России / под ред. П.П. Безруких; Комитет Российского Союза научных и инженерных общественных организаций по проблемам использования ВИЭ. – М., 2005. – С. 42.

14. Николаев, В.Г. Возможности технико-экономической оптимизации производства электроэнергии в России на основе использования ветроэнергетических и гидравлических станций / В.Г. Николаев, С.В. Ганага // Доклады международного форума «Эколого-энергетические технологии в постиндустриальном мире». – М., 2007. – С. 81.

15. Николаев, В.Г. Современные средства и результаты сравнительного экспресс-анализа энергетической и экономической эффективности возобновляемых и топливотребляющих источников энергии / В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов // Доклады III Международной научно-технической конференции «Возобновляемая и малая энергетика – 2006». – 2006. – С. 66.

COMPARATIVE EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF VERTICAL AND HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINES IN A LIMITED AREA

A.A. Kozin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, dgeri3@yandex.ru

It was compared the work of wind farms, consisting of a vertical-axis and horizontal-axis wind turbines of equal power, with approximately equal swept area. It was estimated the efficiency of use land areas to be allocated for the construction of vertical-axis wind turbines, as well as of horizontal-axis wind turbines. It was counted the value of potential output possible horizontal axis and vertical axis wind turbines, depending on the speed of the wind flow. It was made a comparison of the total usable capacity for the considered types of wind turbines installed in an area of 1 km², depending on the speed of the wind flow. It was made the calculation of the net power of wind turbines based on actual wind conditions. It was made the conclusions about the most effective type of wind turbines for use in this territory on the basis of calculations made, as well as the possible solutions to optimize the placement of wind turbines.

Keywords: wind power station, the production of wind power electricity, wind turbines in the wind farm.

References

1. Shefter Ya.I. Wind power units. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, p. 49.
2. Gasch R., Twele J. Wind Power Plants. Fundamentals, Design, Construction and Operation. Solarpraxis. Berlin, James & James Publ., 2002, p. 73.
3. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind Energy Explained: Theory, Design, and Application. John Wiley & Sons. Ltd. England., 2000, p. 94.
4. Ganaga S.V., Kudryashov Y.I., Nikolaev V.G. Advanced search capabilities and the feasibility of optimal energy options on the basis of traditional and renewable energy sources. Moscow, LKI, 2004, p. 33.
5. Kozin A.A. Factors that determine the operation of wind turbines in a limited area. Herald of South Ural state university. vol. «Energy», no. 18, pp. 133–134.
6. Solomin E.V. Information / E.V.Solomin / SRC-Vertical. – www.src-vertical.com (accessed 22 February 2013).
7. Handless P.P., Arbuzov J.D., Borisov G.A. Resources and the efficient use of renewable energy sources in Russia. St-Pb., Science, 2002, p. 33.
8. Zubarev V.V., Minin V.A., Stepanov I.R. The use of wind energy in the North. Leningrad, 1989, p. 53.
9. Fateev E.M. Wind turbines and wind turbines. Moscow, OGIZ, 1948, p. 79.
10. Jaras L., Hoffman L., Jaras A., Obermaier G., Wind Energy. Evaluation of technological and economic potential. Moscow, 1982, p. 102.
11. Nikolaev V.G. The National Inventory of wind energy resources in Russia and methodological basis for their determination Atmograd Publ., Moscow, 2008, p. 197.
12. Wind Power Technology. EWEA Publ., 2004, p. 12.
13. Bezrukih P.P. The concept of using wind power in Russia. Committee of the Russian Union of Scientific and Engineering organizations on the use of renewable energy sources, Moscow, 2005, p. 42.
14. Nikolaev V.G., Ganaga S.V. The possibilities of technical and economic optimization of electricity production in Russia through the use of wind power and hydroelectric stations. Reports of the International Forum "Ecological and energy technologies in the post-industrial world", Moscow, 2007, p. 81.
15. Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Y.I. Modern tools and the results of the comparative analysis of rapid energy and cost-effectiveness of renewable sources of energy and fuel-consuming. Reports of III International scientific and technical conference "Renewable and small power – 2006", 2006, p. 66.

Поступила в редакцию 10.04.2013 г.