

УДК 662.611

Таймаров Михаил Александрович

доктор технических наук, профессор

E-mail: taimarovma@yandex.ru

Тимербаев Наиль Фарирович

доктор технических наук, профессор

E-mail: spekgeu@gmail.com

Казанский государственный энергетический университет

Адрес организации: 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

Лавирко Юрий Васильевич

кандидат технических наук, доцент

E-mail: lav.yu55@gmail.com

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая д. 1

Использование ветроэнергетики для электроснабжения строительства в труднодоступных и удаленных районах

Аннотация

Постановка задачи. Потребность в углеводородном топливе в настоящее время непрерывно возрастает в связи с вводом в промышленности новых технологических мощностей, а также с расширением строительства и с увеличением количества транспортных средств, использующих двигатели внутреннего сгорания. Для удаленных и труднодоступных районов крайнего Севера России и Сибири также большой проблемой является доступность к источникам моторного топлива. В этой связи для стационарных установок, таких как технологические агрегаты строительной индустрии, работающих на нефтепродуктах или же потребляющих электроэнергию в условиях удаленности от линий электропередач и источников моторного топлива, альтернативой является использование возобновляемых источников энергии, к числу которых относится ветроэнергетика.

Результаты. Применение промышленной ветроэнергетики и создание мощных ветропарков для выработки электроэнергии в удаленных и труднодоступных районах России сдерживаются отсутствием необходимых финансовых средств, так как стоимость ветрогенераторов промышленного исполнения очень высока. Срок окупаемости при этом длительный. Поэтому предпочтительным для производственного использования является использование, проектирование и создание ветрогенераторов с выработкой количества электроэнергии, достаточного для обеспечения малых и средних производственных мощностей, к числу которых относится строительная индустрия, обеспечивающая начальные этапы создания технологических мощностей, например, при переработке полезных ископаемых, лесопереработке, строительстве подъездных путей и т.д. При создании таких ветрогенераторов используются готовые узлы и блоки, применяемые в автотранспорте, железнодорожном и водном транспорте, сельском хозяйстве, так как на первой стадии производства электроэнергии с помощью ветрогенераторов главными приоритетами являются простота конструкции, дешевизна узлов и безотказность в эксплуатации. Ветрогенераторы, выпускаемые для бытовых целей и частного использования, не могут применяться ввиду незначительной электрической мощности и ненадежности в эксплуатации.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что ветрогенераторы могут быть использованы для выработки электрической энергии для малых и средних предприятий, занимающихся вопросами строительства, переработки лесоматериалов и малотоннажного производства строительных материалов. В результате исследования выявлено, что в пределах до 10 кВт электрической мощности ветрогенераторы могут быть рентабельны при условии использования в их конструкции узлов и блоков, освоенных в электротехническом производстве, а также элементов, используемых в автомобильной промышленности и в других отраслях.

Ключевые слова: ветроэнергетика, электрогенератор, привод, электроснабжение, число оборотов, скорость ветра, мощность, радиус, ветроколесо, электродвигатель, ветрогенератор.

Введение

Ветрогенератор – это устройство, преобразующее кинетическую энергию ветра в механическую энергию вращения вала с последующим ее применением в качестве привода электрогенератора. Среди трех групп ветрогенераторов: промышленных, коммерческих и бытовых [1-14], наиболее представительными и системообразующими являются промышленные, которые вводятся в эксплуатацию государством или крупными энергетическими компаниями.

Их электрическая мощность может достигать 50 МВт, и они объединяются в сети, в результате чего получается ветряные электростанции. Необходимым условием их возведения является высокий среднегодовой уровень силы ветра. Конструкция мощных ветрогенераторов одинакова и за основу взят, расположенный в гондоле, горизонтальный ротор с тремя лопастями, которые создают значительную площадь сопротивления потоку ветра. Ротор передает вращательное движение на электрогенератор для выработки электроэнергии. Вся конструкция, включая лопасти, ротор, гондолу, электрогенератор и электромеханическую часть поворота гондолы, располагается с помощью башни с фундаментом, углубленным в грунт, на значительной высоте не менее 70 м, для улавливания мощных воздушных потоков. Из анализа конструкции следует, что возведение таких энергосиловых объектов в удаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера России и Сибири является финансово затратным и сложно реализуемым мероприятием. Потому приемлемым решением является возведение ветрогенераторов несетевого назначения, предназначенных для обеспечения строительных нужд, малотоннажной переработки полезных ископаемых, лесопереработки и лесопильного производства строительных материалов.

Объект исследования и используемая методика

Для ветрогенераторов небольшой мощности применительно к потребностям строительства, объектам сельскохозяйственного, геологоразведывательного, горнодобывающего и полевого назначения, наиболее важным является выбор мощности электрогенератора в соответствии с преобладающей силой ветра и нагрузкой, которые обеспечивают безотказность в эксплуатации и полезное использование мощности в соответствии с производственными потребностями. В этой связи объектом исследования является выявление закономерностей взаимосвязи скорости ветра, полезной площади и диаметра лопастей, числа оборотов вала электрогенератора и его нагрузки со стороны потребителей электроэнергии. Число оборотов вала электрогенератора является одним из важных технических режимных параметров, так как при понижении числа оборотов снижается генерация электрической энергии, несмотря на то, что площадь лопастей при большом их диаметре воспринимает значительное количество ветровой нагрузки при заданной скорости ветра для конкретного региона России. По принципу действия, используемые современные ветроэлектрогенераторы являются преимущественно асинхронными.

Формула для расчета мощности P на выходных клеммах электрогенератора ветряной установки записывается как:

$$P = 0,5\rho Fw^3 K_u K_c K_m, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, равная $1,23 \text{ кг/м}^3$; F – площадь ометания ветроколеса, м^2 ; w – скорость ветра, м/с ; K_u – коэффициент использования энергии ветра, равный $0,35 \dots 0,45$; K_c – коэффициент полезного действия электрогенератора, равный $0,9$; K_m – коэффициент полезного действия мультипликатора, равный $0,8$.

Ветровая нагрузка по мощности выражается зависимостью:

$$P_g = 0,5\rho Fw^3, \text{ Вт}. \quad (2)$$

Отсюда, площадь ометания ветроколеса F при известных значениях мощности на клеммах электрогенератора равна:

$$F = P/0,5\rho w^3, \text{ м}^2. \quad (3)$$

По известной площади F можно найти радиус ветроколеса:

$$r_g = (F/\pi)^{0,5}, \text{ м.} \quad (4)$$

Определение количества оборотов в минуту n_g , развиваемого ветроколесом, производится по формуле:

$$n_g = 60wz/2\pi r_g, \text{ об/мин.} \quad (5)$$

где z – коэффициент быстроходности ветроколеса.

На рис. 1 приведены значения коэффициента использования энергии ветра K_u в зависимости от коэффициента быстроходности z различных типов ветроколес.

Как видно по рис. 1, самый высокий коэффициент использования энергии ветра K_u имеют малоллопастные колеса, которые характеризуются большими значениями коэффициента быстроходности, составляющими $z = 4 \dots 7$.

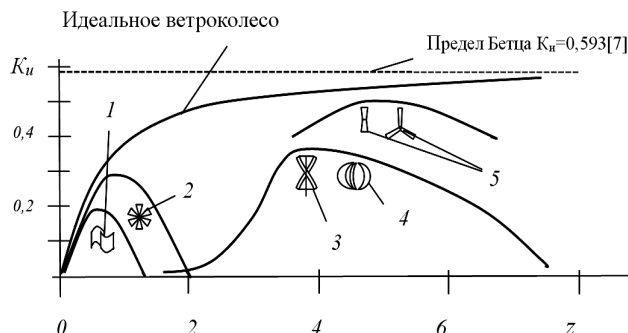


Рис. 1. Коэффициент использования энергии ветра K_u в зависимости от быстроходности z при различных типах ветроколес (иллюстрация автора):
1 – ветроколесо Сигурта Савониуса $K_u=0,2$; 2 – тихоходное многолопастное ветроколесо $K_u=0,3$;
3 – геликоидный ротор $K_u=0,4$; 4 – ротор Дарье $K_u=0,3$;
5 – быстроходные малоллопастные ветроколеса $K_u=0,45$

На рис. 1 также показано предельное значение $K_u \approx 0,593$, как предел Бетца для идеального ветроколеса, к показателям конструкции которого должны стремиться разработчики.

При оптимальных параметрах сочетания числа оборотов ветроколеса n_g и числа оборотов электрогенератора n_e мощность электрической нагрузки потребителей электроэнергии $P_{э,н}$ и мощность P_g равны между собой, то есть $P_{э,н} = P_g$.

При $P_{э,н} > P_g$ происходит торможение ротора ветроколеса, а обороты n_g становятся меньше n_e , и вырабатываемая электрическая мощность P_g снижается. При этом суммарный КПД ветряной установки понижается. Так как скорость ветра можно выразить в виде зависимости $w = \pi D_g n_g$, где D_g – диаметр ветроколеса (м), оптимальное число оборотов n_g можно получить из выражения (1).

Отсюда при $P_{э,н} = P_g$ можно определить значение скорости ветра w_o , которое соответствует оптимальной нагрузке потребителей для заданной конструкции ветрогенератора.

При использовании асинхронных электродвигателей в качестве электрогенераторов для ветряных установок корректируется выбор мощности конденсаторов.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 приведены результаты расчетов электрической мощности P_g ветрогенераторов с трехлопастными ветроколесами радиусов $r_g=3$ м, $r_g=4$ м и $r_g=4,5$ м при различных скоростях ветра w .

По рис. 2 видно, что для скоростей ветра, имеющих место в России, и при приемлемых величинах радиуса r_g ветроколеса, получаемые значения электрической мощности на клеммах электрогенератора невысоки. Для строительных нужд приемлемым является радиус ветроколеса $r_g=4,5$ м при скорости ветра $w=6$ м/с. Однако при этом необходимо иметь несколько ветрогенераторов, обеспечивающих в сумме для потребителей повышенные значения требуемой электрической мощности для строительных работ. На рис. 3 приведена зависимость числа оборотов ветроколеса n_g от скорости ветра w при различных радиусах ветроколеса r_g .

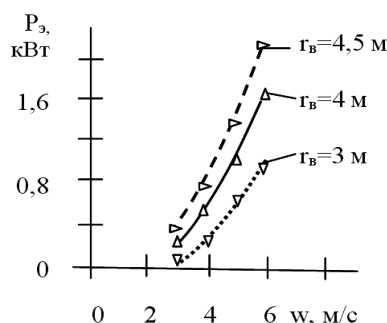


Рис. 2. Результаты расчетов электрической мощности $P_{э}$ ветрогенераторов с трехлопастными ветроколесами радиусов $r_{в}=3$ м, $r_{в}=4$ м и $r_{в}=4,5$ м w при различных скоростях ветра w (иллюстрация автора)

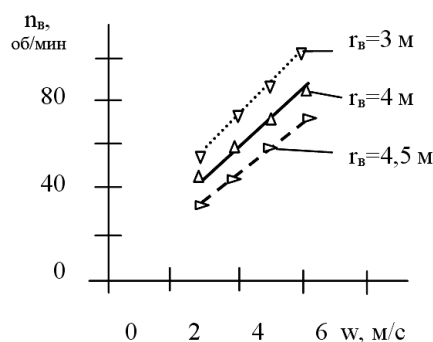


Рис. 3. Зависимость числа оборотов трехлопастного ветроколеса $n_{в,к}$ от скорости ветра w при различных радиусах ветроколеса $r_{в}$ (иллюстрация авторов)

Как видно по рис. 3, с уменьшением радиуса ветроколеса $r_{в}$ число его оборотов $n_{в}$ при постоянной скорости ветра w сильно возрастает. Однако электрическая мощность $P_{э}$ с уменьшением радиуса ветроколеса снижается (рис. 2). Поэтому при строительстве ветрогенераторов необходимо изначально учитывать преобладающее значение скорости ветра в течение года и, в зависимости от потребности производства в электрической мощности, выбирать радиус ветроколеса.

На рис. 4 приведена зависимость развиваемой электрической мощности $P_{э}$ от радиуса ветроколеса $r_{в}$ при различных скоростях ветра w в сравнении с экспериментальными данными других авторов [10].

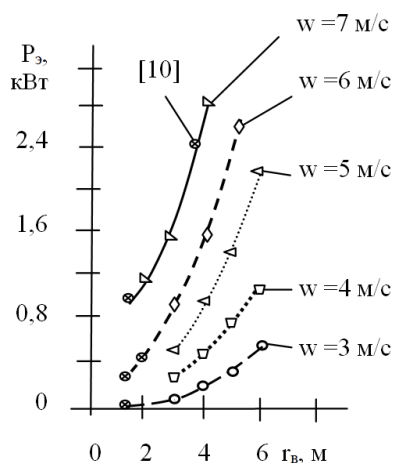


Рис. 4. Зависимость развиваемой электрической мощности $P_{э}$ от радиуса трехлопастного ветроколеса $r_{в}$ при различных скоростях ветра w в сравнении с экспериментальными данными других авторов [10]

Как видно по рис. 4, результаты расчетов хорошо коррелируют с экспериментальными данными других авторов. В производстве ветрогенераторов [11-14] имеется тенденция по проектированию ветрогенераторов с радиусом ветроколеса r_v до 6 м. Практическое значение для строительства в отдаленных и труднодоступных районах имеют ветрогенераторы с радиусом ветроколеса свыше двух метров, так как развиваемые электрогенераторами мощности при радиусе ветроколес до двух метров малы для того, чтобы использовать их в составе ветропарков, то есть объединяя несколько ветрогенераторов для набора необходимой мощности при невысоких скоростях ветра.

В таблице приведены сравнительные показатели применимости различных марок ветрогенераторов для использования в удаленных районах строительства.

Таблица

**Сравнительные показатели применимости различных марок ветрогенераторов,
для использования в удаленных районах строительства**

Марка ветрогенератора	Мощность при ветре 6 м/с, кВт	Радиус ветроколеса, м	Тип электрогенератора	Число лопастей	Быстроходность, z	Обороты ветроколеса, об/мин	Коэффициент использования ветра
ВИСХОМ Д3,5	0,9	1,8	трехфазный асинхронный	2	7	306	0,38
ВИМЭ ТВ3	0,7	1,5	трехфазный асинхронный	18	1,2	67	0,29
ТВ5	1,8	2,5	трехфазный асинхронный	24	1,2	40	0,29
ТВ8	4,8	4	трехфазный асинхронный	18	1,2	25	0,29
УНДИМ Д10	7,4	5	трехфазный асинхронный	2	5	78	0,49
ВИМЭ Д12	10,7	6	трехфазный асинхронный	3	4,5	60	0,47
CONDOR AIR WES 380/50-10	8	3,5	трехфазный на постоянных магнитах	3	4,3	35	0,42
Energy Wind	0,8	2	трехфазный асинхронный	3	4,1	40	0,4
Energy Wind	3	3,5	трехфазный асинхронный	3	4,2	48	0,4
SAV10	8	R2,5, H4	трехфазный на постоянных магнитах	5	5	60	0,42
ВЕКАР	0,5	1	трехфазный на постоянных магнитах	3	4,2	56	0,42
ВЭУ-3	3	R1,7, H3,8	трехфазный на постоянных магнитах	6	5	60	0,45
Роторный синхронный «Орион»	1	4	Роторный синхронный двигатель	6	4	174	0,35
Energy Stock	0,6	1,8	Синхронный электрогенератор	3	4,5	60	0,38

Как видно из таблицы ветрогенераторы с тремя лопастями и горизонтальным ротором при числе оборотов ветроколеса около 60 об/мин и радиусом 2,5...3,5 м с трехфазным асинхронным электрогенератором являются предпочтительными перед другими конструкциями.

Постоянные магниты с течением времени ослабевают, синхронные электрогенераторы неустойчивы к короткому замыканию и к перегрузкам в сравнении с асинхронными электрогенераторами. Применение роторного синхронного двигателя в качестве электрогенератора для ветрогенератора «Орион» не позволяет получать высокие мощности при значительных радиусах ветроколеса около 4 м.

Многолопастные ветроколеса с числом лопастей 18 и 24 имеют невысокую быстроходность порядка 1,2. Это сказывается на коэффициенте использования силы ветра и не позволяет достигнуть высокой электрической мощности.

Заключение

1. В эксплуатации при присоединении нагрузки необходимо, чтобы потребляемая мощность соответствовала вырабатываемой на клеммах электрогенератора во всем диапазоне чисел оборотов ветроколеса.

2. При подключении нагрузки потребителей, превышающей мощность электрогенератора, необходимо переходить на ветрогенератор с уменьшенным диаметром ветроколеса для того, чтобы обеспечить баланс между оборотами и мощностью ветроколеса и электрогенератора.

Список библиографических ссылок

1. Таймаров М. А., Лавирко Ю. В. Ветряный генератор на основе асинхронного электродвигателя : сб. статей Международной научно-технической конференции «Новые задачи технической науки и пути их решения» (г. Самара, 13 мая 2017 г.) / Аэтерна. Уфа, 2017. С. 217–219.
2. Таймаров М. А., Лавирко Ю. В. Особенности применения ветряных электрогенераторов с вертикальным ветроколесом : сб. статей Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс как фактор развития современного общества» (г. Оренбург, 25 января 2018 г.) / Аэтерна. Уфа, 2018. С. 122–124.
3. Таймаров М. А., Осипов А. Л., Тимербаев Н. Ф. Параметры ветряных электрогенераторов с вертикальным и горизонтальным ротором : сб. статей Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические аспекты развития научной мысли в современном мире» (г. Уфа, 5 декабря 2018 г.) / Аэтерна. Уфа, 2018. С. 61–63.
4. Таймаров М. А., Афанасьев И. А. Горизонтальный ветрогенератор на постоянных магнитах // Вестник Казан. технол. ун-та. 2014. т. 17. № 11. С. 183–184.
5. Ветроэнергетическая установка. Патент на полезную модель № 112289 от 10 января 2012.
6. Барышева О. Б., Садыков Р. А., Батюшков Н. Ю. Оптимизация трассировки газораспределительной сети низкого давления // Современное строительство и архитектура. 2017. № 3. С. 25–28.
7. Ветроэлектрогенератор. Патент на изобретение № 2518152 от 10 июня 2014 г.
8. Харитонов В. П., Автономные ветроэлектрические установки. М., ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.
9. URL: <https://energo.house/veter/promyshlennye-vetrogeneratory.html>.
10. Кожухов Ю. В., Лебедев А. А., Данилишин А. М., Давлетгареев Э. В. Аудит характеристик ветрогенераторов с применением CFD-моделирования на суперкомпьютере CAD/CAM/CAE // Observer. 2016. № 7 (107). С. 81–87.
11. Номенклатура и характеристики ветрогенераторов компании «EDS Group». Электронный ресурс: energy-ds.ru.
12. Miller N. W. Frequency responsive wind plant controls: Impacts on grid performance // Power and Energy Society General Meeting. IEEE. 2011. P. 1–8.
13. Boyle G. Renewable Energy. Oxford University Press, 2004. 464 p.
14. Chen Z. Wind energy-the world's fastest growing energy source // IEEE Power Electronics Society Newsletter. 2006. v. 18. № 3. P. 17–19.
15. Hansen A. D. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004) // Wind energy. 2007. v. 10. № 1. P. 81–97.

Taimarov Mikhail Alexandrovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: taimarovma@yandex.ru**Timerbaev Nail Farilovich**

doctor of technical sciences, professor

E-mail: cpekgeu@gmail.com**Kazan State Power Engineering University**

The organization address: 420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya st., 51

Lavirko Yuri Vasilyevich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: lav.yu55@gmail.com**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Use of wind energy for power supply of construction objects
in remote and inaccessible areas****Abstract**

Problem statement. The demand for hydrocarbon fuels is currently continuously increasing due to the introduction of new technological capacities in the industry, expansion of construction and an increase in the number of vehicles using internal combustion engines. For remote and inaccessible areas of the far North of Russia and Siberia, access to sources of motor fuel is also a big problem. In this regard, for stationary installations, such as technological units of the construction industry, operating on petroleum products or consuming electricity in a distance from power lines and motor fuel sources, the alternative is the use of renewable energy sources, which include wind energy.

Results. The use of industrial wind energy and the creation of powerful wind farms to generate electricity in remote and inaccessible regions of Russia is hampered by the lack of necessary financial resources since the cost of industrial wind generators is very high. The payback period is long. Therefore, for production use, it is preferable to use, design, and create wind generators with the generation of electricity sufficient to provide small and medium-sized production capacities, which include the construction industry, providing the initial stages of creating technological capacities, for example, in mineral processing, timber processing, and building access paths etc. When creating such wind generators, ready-made units and blocks are used that are used in motor transport, railway and water transport, and agriculture, since at the first stage of electricity production with the help of wind generators, the main priorities are simplicity of design, low cost of units, and failure-free operation. Wind generators produced for domestic purposes and private use cannot be used due to insignificant electric power and unreliability in operation.

Conclusions. This article presents the results of a study on the use of wind generators to generate electrical energy for small and medium-sized enterprises involved in the construction, processing of timber and small-scale production of building materials. As a result of research in the article, it was found that within the range of up to 10 kW of electric power, wind generators can be cost-effective when used in their structure units and blocks mastered in the electrical industry, as well as elements used in the automotive industry and other industries.

Keywords: wind power, electric generator, drive, power supply, speed, wind speed, power, radius, wind wheel, electric motor, wind generator.

References

1. Taimarov M. A., Lavirko Yu. V. Wind generator based on an asynchronous electric motor : coll. of articles of the International scientific and technical conference «New tasks of technical science and ways to solve them» (Samara, May 13, 2017) / Aetern. Ufa, 2017. P. 217–219.

2. Taimarov M. A., Lavirko Yu. V. Features of the use of wind power generators with a vertical wind wheel : coll. of articles of the International scientific-practical conference «Scientific and technological progress as a factor in the development of modern society» (Orenburg, January 25, 2018) / Aetern. Ufa, 2018. P. 122–124.
3. Taimarov M. A., Osipov A. L., Timerbaev N. F. Parameters of wind power generators with vertical and horizontal rotor : coll. of articles of the International scientific-practical conference «Theoretical and practical aspects of the development of scientific thought in the modern world» (Ufa, December 5, 2018) / Aetern. Ufa, 2018. P. 61–63.
4. Taimarov M. A., Afanasyev I. A. Horizontal permanent magnet wind generator // Vestnik Kazan. technol. un-ta. 2014. v. 17. № 11. P. 183–184.
5. Wind power installation. Utility Model Patent № 112289, January 10, 2012.
6. Barysheva O. B., Sadykov R. A., Batyushkov N. Yu. Optimization of low-pressure gas distribution network tracing // Modern construction and architecture. 2017. № 3. P. 25–28.
7. Wind generator. Patent for invention № 2518152, June 10, 2014.
8. Kharitonov V. P. Autonomous wind power installations. M., GNU VIESH, 2006. 280 p.
9. Electronic source: <https://energo.house/veter/promyshlennye-vetrogeneratory.html>.
10. Kozhukhov Yu. V., Lebedev A. A., Danilyshin A. M., Davletgareev E. V. Audit the characteristics of wind generators using CFD modeling on a CAD/CAM/CAE supercomputer // Observer. 2016. № 7 (107). P. 81–87.
11. Nomenclature and characteristics of «EDS Group» wind generators. Electronic resource: energy-ds.ru.
12. Miller N. W. Frequency responsive wind plant controls: Impacts on grid performance // Power and Energy Society General Meeting. IEEE. 2011. P. 1–8.
13. Boyle G. Renewable Energy. Oxford University Press, 2004. 446 p.
14. Chen Z. Wind energy-the world's fastest growing energy source // IEEE Power Electronics Society Newsletter. 2006. v. 18. № 3. P. 17–19.
15. Hansen A. D. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004) // Wind energy. 2007. v. 10. № 1. P. 81–97.