УДК 620.92:621.438, 621.311

В.П. Степаненко

ВЫБОР РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ИСТОЧНИКОВ И НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрены перспективы повышения ресурсосбережения путем применения возобновляемых источников и накопителей энергии в системах автономного электроснабжения, а также продолжения работ по водородной тематике, конвертации горной дизельной техники на водородное топливо. Использование современных ВИЭ и накопителей энергии позволяет добиться повышения ресурсосбережения и экологической безопасности, энергоэффективности и снижения расхода дизельного топлива в горной промышленности. Рассмотрены также способы повышения энергоэффективности горной промышленности путем применения КЭСУ с суперконденсаторами. Предлагаемые технические решения позволят существенно повысить ресурсосбережение, энергоэффективность и экологическую безопасность, уменьшить на 50—70%, расход дизельного топлива.

Ключевые слова: ресурсосбережение, солнечные батареи, ветряные генераторы, энергосбережение, накопители энергии, возобновляемые источники энергии, экологическая безопасность, энергосиловые установки, энергоэффективность, суперконденсаторы, аккумуляторные батареи, дизельное топливо.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-42-49

В России из общего объема производства энергоресурсов не более 5% поступает из возобновляемых источников энергии ВИЭ, причем из 5% примерно 3,5% приходится на гидроэнергетику. Потенциал ВИЭ России, по некоторым оценкам, составляет 270 млн т условного топлива в год [1]. Из них 42% составляет геотермальная энергия, 24% — энергия малых гидроустановок, 13,3% — энергия биоэнергетики (производство дизельного и авиационного биотоплива, древесных пеллет и т.п.) и 13,6% низкопотенциальная энергия, которую можно извлечь тепловыми насосами из верхних слоев земной коры. Потенциал солнечной энергии оценивается величиной 4%, потенциал энергии ветра — 3,7%. Основные причины, замедляющие использование ВИЭ — это наличие в России больших запасов органического топлива и отсутствие государственного стимулирования отрасли [1].

В табл. 1. приведены различные типы электростанций, использующих не возобновляемые и возобновляемые источники энергии [2—8].

В табл. 2 приведены результаты технико-экономического сравнения стоимости 1 кВтч электроэнергии, капитальных и эксплуатационных затрат (в течение 20 лет) возобновляемых и невозобновляемых источников энергии в относительных единицах. Выгодно применение

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 42–49.
© В.П. Степаненко. 2018.

Таблица 1

Типы электростанций и источников энергии

№ пп	Тип электростанции	Источник энергии
Источники не возобновляемой энергии		
1	Тепловые электростанции	Не возобновляемое топливо: газ, уголь, сланец, торф, мазут, дрова и др.
2	Атомные электростанции	Ядерное топливо
3	Дизель-генераторные электростанции	Дизельное топливо
Источники возобновляемой энергии		
1	Солнечные электростанции	Солнечная энергия
2	Ветряные электростанции	Кинетическая энергия ветра
3	Гидроэлектростанции	Энергия воды в реках и водохранилищах
4	Приливные электростанции	Энергия воды в морях и океанах вследствие движения Земли и Луны
5	Волновые электростанции	Энергия волн морей и океанов
6	Геотермальные электростанции	Внутренняя энергия Земли

ВИЭ там, где нет высоковольтных электрических сетей и энергообеспечение осуществляется за счет дизель-генераторных электростанций. А таких районов в России очень много [9—14].

Из рассмотрения табл. 2 следует, что в качестве основных источника возобновляемой энергии на автономных электростанциях следует использовать ветряные генераторы, солнечные панели, солнечные вакуумные коллекторы (для горячего водоснабжения и отопления). В качестве резервного питания можно рассматривать дизель-генераторные установки, конвертированные на газовое и водородное топливо, а также и топливные элементы. Из табл. 2 следует, что СВК характеризуются большими материалоемкостью и капиталовложениями по сравнению с традиционными ЭС. Эксплуатационные затраты при использовании СВК примерно в два раза ниже, чем при питании от ЭС и ДТ.

Стоимость 1 кВтч энергии, полученной от СВК, примерно в 3 раза ниже, чем при питании от ЭС и от дизель-гене-

Таблица 2

Сравнение различных источников энергии

Источник энергии	Относительные затраты			Стоимость 1 кВтч энергии
	капитальные	эксплуатационные		
		за 10 лет	за 20 лет	
Дизельное топливо ДТ	1,0	1,0	1,0	1,0
Водород H_2	0,9	0,7	0,6	0,4
Высоковольтные электрические сети ЭС	0,13	0,75	0,63	0,95
Солнечные вакуумные коллекторы СВК	0,8	0,5	0,43	0,32
Ветряные генераторы ВЭУ	0,7	0,5	0,5	0,15
Солнечные панели СП	0,6	0,4	0,4	0,1

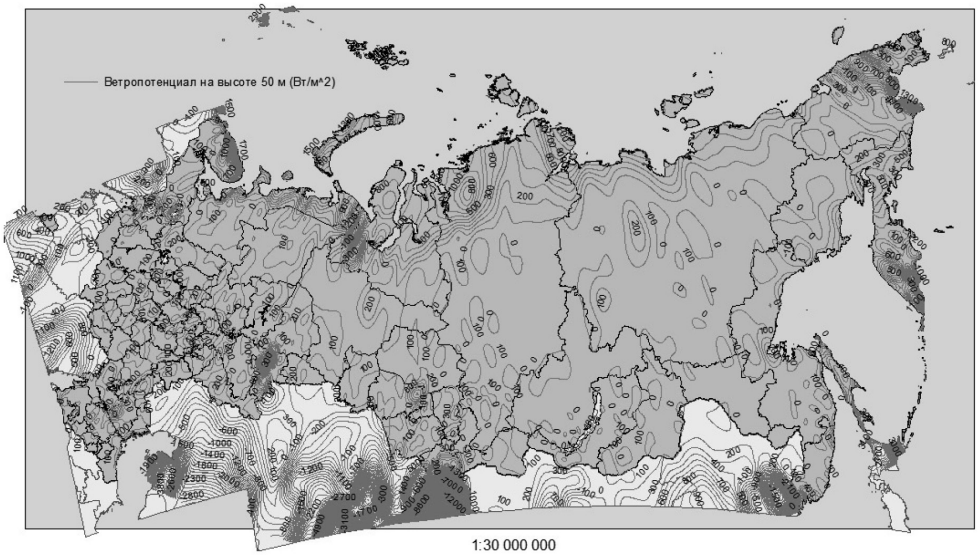

Рис. 1. Ветряной потенциал России

раторных установок ДТ. Стоимость энергии, полученной от СП и ВЭУ, является самой низкой. Стоимость 1 кВтч электроэнергии, полученной от ВЭУ, в 4 раз ниже, чем от ДТ [4, 7—14].

Энергия СП в 4 раза дешевле, чем ЭС. Наибольшие капитальные и эксплуатационные затраты и наихудшие технико-экономическое показатели присущи дизель-генераторным установкам [18—21, 29—30].

Достоинством ветроэнергетических установок по сравнению с солнечными панелями в том, что они вырабатывают электрическую энергию и в темное время суток. На рис. 1 представлена карта распределения ветряного потенциала по территории России на середину XXI в. [1].

Наиболее высокие показатели имеют прибрежные, шельфовые и оффшорные ветряные электростанции, разме-

Рис. 2. Офшорная ветрогенераторная система

щенные на значительном удалении от берега (10—60 км), которые стабильно работают за счет морских бризов, так как морские ветры регулярны и обладают значительной скоростью. На рис. 2 приведен внешний вид оффшорной ветряной электростанции [1].

Энергия ветра *E* является кинетической, она зависит от массы *m* и квадрата скорости воздуха проходящего через турбину v^2, т.е.

$$E = m \cdot v^2 / 2 \qquad (1)$$

Мощность ветрогенератора зависит от мощности воздушного потока определяемой скоростью ветра, плотностью воздуха и ометаемой площадью турбины:

$$P = V^3 \cdot \rho \cdot S \qquad (2)$$

где *V* — скорость ветра, м/с; ρ — плотность воздуха, кг/м^3; *S* — ометаемая площадь, м^2.

Из формул (1) и (2) следует, что энергия и мощность ветряной электростанции зависит от скорости, плотности и температуры воздуха. Отсюда можно сделать вывод о том, что энергоэффективность ветряной электростанции зависит и от географического ее местоположения, времени года, времени суток и погодных условий. Кроме того, ветряные электростанции неэффективны без накопителей, которые могут аккумулировать избыток энергии в ветреные дни и отдавать во время штиля.

Ветряные электростанции не обладают полной экологической безопасностью. Предельный уровень шума при их работе может превышать допустимые значения. В Арктике, на Урале, в Сибири, Якутии, Чукотке, Камчатке и в других регионах, на территориях, где высоковольтные электрические сети и системы отсутствуют, экономически целесообразно строить автономные электростанции, использующие ВИЭ, с перспективой объединения их в более мощные энергетические системы.

Ветряные энергетические установки ВЭУ имеют высокие показатели при размещении их на территориях, прилегающих к незамерзающим морям и океанам. Существенным недостатком ВЭУ является нестабильность развиваемой ими мощности вследствие изменчивости направления и силы ветра во времени. Этот недостаток можно скомпенсировать, если в автономной системе электроснабжения объединить достаточно большое количество ветряных и солнечных генераторов, то средняя их мощность будет постоянной. Солнечная энергия — основной источник жизни на Зем-

Рис. 3. Карта дневной солнечной радиации (кВтч/м^2 день) на территории России

Рис. 4. Солнечные энергоресурсы России

ле, ее годовой приток составляет (1069 · · 10^{15}) кВт*ч/год.

На большей части территории России с числом часов солнечного сияния менее 1700 ч в год можно успешно использовать солнечные батареи в сезонном режиме, а в районах с числом часов солнечного сияния более 2000 ч/год — в течение всего года. Рассчитать энергию *W*, отданную солнечным модулем за интересующий нас период, можно следующим образом: из таблиц взять значение солнечной радиации, разделить его на 1000. Получим условное время, в течение которого солнце светит как бы с интенсивностью 1000 Вт/м^2. Модуль мощностью *Pw* в течении выбранного периода выработает количество энергии, которое вычисляется по формуле:

$$W = k\,Pw\,E\,/\,1000, \qquad (3)$$

где *E* — значение инсоляции за выбранный период; *k* — коэффициент равный 0,5 летом и 0,7 в зимний период.

На рис. 3 приведено распределение по территории России солнечных энергетические ресурсов и продолжительности солнечного сияния (час/год), а на рис. 4 приведено распределение по территории России солнечных энергетические ресурсов и продолжительности солнечного сияния (час/год) [1]. Обеспечить стабильность энергоснабжения при нестабильных источниках энергии можно только с помощью накопителей энергии: (индукционных. инерционных, электрохимических, суперконденсаторов, топливных элементов и других).

Анализ показывает, что аккумуляторные батареи при длительных 2—3-кратных и пиковых 5—7-кратных перегрузках не смогут обеспечить устойчивое электроснабжение. Для устранения этого недостатка необходимо применять комбинированные накопители энергии, в состав которых должны входить суперконденсаторы (конденсаторы с двойным электрическим слоем КДЭС) и электрохимические аккумуляторные батареи) [4—14].

Для автономных электростанций наибольшие перспективы использования в качестве накопителей имеют суперконденсаторы КДЭС и литий-железо-фосфатные аккумуляторы LiFePO4 (LFP). Эти аккумуляторы имеют больший срок службы,

чем литий-кобальтовые и более стабильное напряжение при разряде, их удельная энергоемкость равна 90—140 Втч/кг, а отсутствие в его пластинах кобальта повышает экологическую безопасность аккумуляторов. Высокие значения удельной мощности суперконденсаторов КДЭС и энергии, запасаемой в литий-железофосфатных аккумуляторах LiFePO4 (LFP) позволяют эффективно использовать их в качестве накопителей в системах автономного электроснабжения.

Повысить экологическую безопасность, ресурсо- и энергосбережение систем автономного энергоснабжения можно не только применением ВИЭ, но и конвертацией дизельных и бензиновых двигателей на газовое или водородное топливо. В 1941—1944 гг. в осажденном Ленинграде вместо бензина автомобили заправляли водородом из аэростатов противовоздушной обороны. Конвертацией автомобилей на водород руководил лейтенант Петр Шелищ [27].

В 1973—1978 гг. в Люберцах в Институте горного дела им. академика А.А. Скочинского были выполнены работы по конвертации рудничных подземных дизелевозов на водородное топливо. В работах по конвертации участвовали д.т.н. В.И. Серов, д.т.н. Р.В. Малов, к.т.н. В.П. Степаненко, к.т.н Ю.П. Юдин [27, 28]. В двухтысячные годы в ГМК «Норильский никель» с участием Российской Академией Наук велись работы по использованию водорода в горной промышленности.

В настоящее время в России с целью повышения экологической безопасности и энергоэффективности ведутся работы по конвертации горных дизельных машин на газовое топливо [22, 23]. На Украине ведутся работы по применению возобновляемых источников энергии и комбинированных энергосиловых установок в горной промышленности [15—17].

При добыче полезных ископаемых применение возобновляемых источников ВИЭ, суперконденсаторных и электрохимических накопителей энергии позволит повысить энергоэффективность, ресурсосбережение и экологическую безопасность, снизить расход дизельного топлива и смазочных материалов не менее, чем на 30—50%.

Повысить экологическую безопасность, ресурсо- и энергосбережение систем автономного энергоснабжения можно не только применением ВИЭ, но и конвертацией дизельных и бензиновых двигателей на газовое или водородное топливо. Избыточную энергию солнечных и ветровых генераторов можно использовать для получения горючих газов и водорода, пригодных для питания дизель-генераторных установок на автономных электростанциях. По оценке специалистов, появление электролизных реакторов водорода, пригодных для установки на автономных электростанциях, можно ожидать не ранее, чем через лет 20—30 [31].

Выводы.

1. Основные причины, замедляющие использование ВИЭ в России, — наличие больших запасов органического топлива и отсутствие государственного стимулирования отрасли.

2. На автономных электростанциях целесообразно использовать гибридные накопители энергии, состоящие из литий-железо-фосфатных аккумуляторов LiFePO4 (LFP) и суперконденсаторов МЛСК-130-57, разработанных ООО «ТЭЭП», г. Москва, НИТУ «МИСиС». Применение дизель-генераторных установок и гибридных накопителей позволит повысить надежность и энергоэффективность автономных электростанций, снизить расход дизельного топлива и смазочных материалов не менее, чем на 50—70% [10—14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Степаненко В.П.* Анализ перспектив применения в горной промышленности нетрадиционных возобновляемых источников энергии и суперконденсаторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 1. — С. 185—194.

2. *Степаненко В.П.* К вопросу применения накопителей и возобновляемых источников энергии в условиях низких температур // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 2. — С. 195—201.

3. *Степаненко В.П.* Возобновляемые источники и накопители энергии в системах автономного электроснабжения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 6. — С. 149—15.

4. *Gasch R., Twele J.* Wind Power Plants. Fundamentals, Design, Construction and Operation. Second Edition. Springer, 2012. 567 p.

5. *Adaramola M.* Wind Turbine Technology: Principles and Design CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. XXII, 334 p.

6. *Foley A.M.*, *Leahy P.G.*, Marvuglia A., Mc*Keogh E.J.* Current methods and advances in forecasting of wind power generation. Renewable Energy International Journal, 2012, vol. 37 no 1, pp. 1—8.

7. *Blaabjerg F., Liserre M., Ma K.* Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, vol. 48, no 2, pp. 708—719.

8. *Eremia M., Shahidehpour M.* Handbook of Electrical Power System Dynamics. Modeling, Stability and Control IEEE Press, 2013. 976 p.

9. Xing L., Wang J., Dooner M., Clarke J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Applied Energy, 2015, vol. 137, pp. 511—536.

10. *Kalogirou S.A.*, Solar Energy Engineering. Processes and Systems. Second edition. Elsevier, 2014. 840 p.

11. *Kleissl J.* Solar Energy Forecasting and Resource Assessmen. Elsevier, 2013. 462 p.

12. *Ley M.И.*, *Jepsen L.H.*, *Lee J.L.H., Cho Y.S. Y.W., Bellosta von Colbe, J.M., Dornheim, M., Rokni, M., Jensen, J.O., Sloth, M.-Filinchuk Y. et al.* Complex hydrides for hydrogen storage — New perspectives. MaterialsToday, 2014, 122–128.

13. *Pushkin K.V.*, Controlled hydrogen generator and additional source of electrical current for independent oxygen-hydrogen power plants. 2014. Available at: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0558_paper.pdf.

14. *Белозеров В.И.*, *Степаненко В.П.* Потребность создания карьерных локомотивов с накопителями энергии // Горная промышленность. — 2014. — № 5. — С. 76.

15. *Степаненко В.П.* Повышение энергоэффективности и ресурсосбережения рудничного электровозного транспорта // Вісник Криворізького национального університету. — 2016. — Вип. 42. — С. 20—25. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Степаненко Валерий Павлович — кандидат технических наук,
доцент, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: valestepanenko@yandex.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 2, pp. 42–49.

V.P. Stepanenko

RESOURCE-SAVING ENERGY SOURCES AND STORAGE UNITS FOR SELF-CONTAINED POWER SUPPLY

In focus of the study are the prospects of resource-saving improvement using renewable energy sources and storage units in systems of self-sustained power supply as well as continuation of the research in the area of hydrogen and conversion of diesel-powered mining machines to hydrogen fuel. The modern renewable energy sources and storage units allow enhancement of resource-saving,

environmental safety and energy efficiency and reduction in diesel fuel consumption in mining industry. The approaches to the improvement of energy efficiency in mining industry using combined power plants (KESU) with supercapacitors are discussed. The proposed engineering solutions will enable essentially better resource-saving, energy efficiency and environmental safety, and will allow reducing diesel fuel consumption by 50–70 %.

Key words: resource-saving, solar batteries, windmills, energy saving, energy storage unit, renewable energy sources, environmental safety, power plants, energy efficiency, supercapacitors, accumulator batteries, diesel fuel.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-42-49

AUTHOR

Stepanenko V.P., Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: valestepanenko@yandex.ru,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Stepanenko V. P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 1, pp. 185—194.
2. Stepanenko V. P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 2, pp. 195—201.
3. Stepanenko V. P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 6, pp. 149—15.
4. Gasch R., Twele J. *Wind Power Plants. Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Second Edition. Springer, 2012. 567 p.
5. Adaramola M. *Wind Turbine Technology: Principles and Design.* CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. XXII, 334 p.
6. Foley A. M., Leahy P. G., Marvuglia A., McKeogh E. J. Current methods and advances in forecasting of wind power generation. *Renewable Energy International Journal*, 2012, vol. 37 no 1, pp. 1—8.
7. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K. Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, vol. 48, no 2, pp. 708—719.
8. Eremia M., Shahidehpour M. *Handbook of Electrical Power System Dynamic*s. Modeling, Stability and Control IEEE Press, 2013. 976 p.
9. Xing L., Wang J., Dooner M., Clarke J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 2015, vol. 137, pp. 511—536.
10. Kalogirou S. A. *Solar Energy Engineering. Processes and Systems*. Second edition. Elsevier, 2014. 840 p.
11. Kleissl J. *Solar Energy Forecasting and Resource Assessmen*. Elsevier, 2013. 462 p.
12. Ley M. И., Jepsen L. H., Lee J. L.H., Cho Y. S. Y.W., Bellosta von Colbe, J.M., Dornheim, M., Rokni, M., Jensen, J.O., Sloth, M.-Filinchuk Y. et al. Complex hydrides for hydrogen storage New perspectives. *Materials Today*, 2014, 122–128.
13. Pushkin K. V. *Controlled hydrogen generator and additional source of electrical current for independent oxygen-hydrogen power plants*. 2014. Available at: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0558_paper.pdf.
14. Belozerov V. I., Stepanenko V. P. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, no 5, pp. 76.
15. Stepanenko V. P. *Visnik Krivoriz'kogo natsional'nogo universitetu*. 2016. Vip. 42, pp. 20—25.

FIGURES

Fig. 1. Wind power potential of Russia.
Fig. 2. Off-shore wind power generation system.
Fig. 3. Map of diurnal solar radiation (kW/m^2 day) in the territory of Russia.
Fig. 4. Solar energy resources of Russia.

TABLES

Table 1. Types of electric power plants and energy sources.
Table 2. Comparison of different energy sources.