

УДК 620.92

Оценка ветропотенциала Мурманской области и эффективности Кольской ветроэлектростанции

В. Ф. Белей*, Г. В. Коцарь

*Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;
e-mail: vbeley@klgtu.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
17.09.2020;
получена
после доработки
14.12.2020

Дан анализ перспектив развития ветроэнергетики, а также отражена информация о доле ветроэнергетики в производстве электроэнергии в мире и Российской Федерации. Приведены данные о валовом, техническом и экономическом потенциалах России и Мурманской области. При расчете валового ветропотенциала региона использованы данные последних 10 лет наблюдений, проводимых на 37 метеостанциях. Для 6 зон различной ветровой активности территории Мурманской области рассчитан валовой ветропотенциал на высоте флюгера 10, 50, 100 и 150 м. Так, для Мурманской области для высоты 150 м валовой потенциал оценен в 23 090 млрд кВт·ч. В 2021 г. подразделением Группы Enel в Мурманской области должна быть возведена ветроэлектростанция (ВЭС) "Кольская" мощностью 201 МВт, состоящая из 57 ветроустановок Siemens Gamesa SG 3.4-132 единичной мощностью 3,465 МВт. Для Кольской ВЭС определена годовая выработка электроэнергии. Расхождение полученных результатов с показателями, заявленными специалистами из Группы Enel, составляет менее 15 %. Рассмотрены варианты размещения Кольской ВЭС в других зонах ветровой активности, для которых была оценена годовая выработка электроэнергии и коэффициент использования установленной мощности. Определено, что при размещении Кольской ветроэлектростанции в зоне с наибольшей в области ветровой активностью, ее выработку можно было бы увеличить до 1,5 раз. Рассмотрена энергосистема Мурманской области. Разработана математическая модель энергосистемы на базе ПО NEPLAN и оценена ее достоверность. Расчеты режимов работы Кольской ВЭС в составе энергосистемы Мурманской области, выполненные на математической модели, показали, что уровни напряжений в узлах энергосистемы и перетоки мощностей в эксплуатационных режимах Кольской ВЭС находятся в рамках допустимых нормативными документами значений. Показана эффективность регулирования реактивной мощности ВЭС.

Ключевые слова:

ветроэнергетика,
ветропотенциал,
ветроэлектростанция,
энергия,
напряжение,
эффективность,
модель

Для цитирования

Белей В. Ф. и др. Оценка ветропотенциала Мурманской области и эффективности Кольской ветроэлектростанции. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 4. С. 376–386. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-376-386.

Assessment of wind energy potential of the Murmansk Region and performance of Kola wind farm

Valeriy F. Beley*, German V. Kotsar

*Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia;
e-mail: vbeley@klgtu.ru

Article info

Received
17.09.2020;
received
in revised
14.12.2020

Abstract

The paper gives an analysis of perspectives for development of wind power generation, information on the share of wind energy in electricity generation in the world and in Russian Federation is provided as well. Data on gross, technical, economic potential of wind energy of Russia and the Murmansk Region has been presented. When calculating the gross wind energy potential of the region, data from the last 10 years of observations carried out at 37 meteorological stations have been used. The territory of the region has been divided into 6 distinctive zones, based on the wind activity. Gross energy potential has been calculated for each zone: for the heights of 10, 50, 100, and 150 m. Gross wind energy potential of the region at the height of 150 m has thus been estimated at 23,090 billion kWh. The Murmansk Region's 201 MW Kola wind farm, which consists of 57 Siemens Gamesa SG 3.4-132 wind turbines with a unit capacity of 3.465 MW, is to be constructed by 2021 under the direction of Enel Green Power. Wind energy potential and annual power generation of the Kola wind farm have been assessed. The difference between the obtained results and calculations of Enel Group's specialists amounts to less than 15 %. For the cases of relocation of Kola wind farm to different wind zones, the annual power generation of the wind farm has been estimated. It has been determined, that in case of Kola wind farm's relocation to the zone with the highest wind activity its annual electricity generation could be increased up to 1.5 times. A model of the Kola energy system has been developed in NEPLAN software, its validity has been proven. The calculations of the wind farm's operation modes show that voltage levels of the system nodes and powerflows are within the boundaries defined by normative documents. The effectiveness of reactive power regulation of the wind farm has been shown.

Key words:

wind power,
wind speed,
wind energy potential,
wind farm,
energy,
voltage,
effectiveness,
model

For citation

Beley, V. F. et al. 2020. Assessment of wind energy potential of the Murmansk Region and performance of Kola wind farm. *Vestnik of MSTU*, 23(4), pp. 376–386. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-376-386.

Введение

Ветроэнергетика – одна из наиболее быстроразвивающихся отраслей мировой энергетики. В рамках развития ветроэнергетики России до 2024 г. планируется возвести 15 ветроэлектростанций (ВЭС) суммарной установленной мощностью 5,5 ГВт. Одна из этих ВЭС возводится в Мурманской области. Важнейшим фактором, определяющим эффективность ВЭС, является ветровой потенциал в месте ее расположения. Анализ данных, приведенных в работах по оценке ветропотенциала России и Мурманской области, показал их значительное расхождение, отсутствие достоверной информации о ветропотенциале на высотах более 100 м – высота ступиц современных ветроустановок. При решении вопросов, связанных с проектированием новых ВЭС, наряду с такими факторами, как оценка ветропотенциала и выполнение экологических требований, необходимо проводить оценку возможностей подключения и работы ВЭС в составе электроэнергетической системы, так как современные ВЭС по мощности соизмеримы с электроэнергетическими системами. Поэтому все чаще пропускная способность сети становится характеристикой места установки ВЭС. Таким образом, на примере Мурманской области представляется актуальным уточнение ветропотенциала Мурманской области и оценка эффективности Кольской ВЭС при ее работе в составе энергосистемы региона.

Использование ветроэнергетических ресурсов в мире и России

В мире наблюдается устойчивый рост доли ветроэнергетики в производстве электроэнергии (табл. 1, 2)¹ (Белей и др., 2018а; б; 2019).

Таблица 1. Доля ветроэнергетики от общего производства электроэнергии в мире
Table 1. Share of wind energy in worldwide electricity generation

Годы	2008	2019	2030 (прогноз)
Доля ветроэнергетики, %	1,5	5,27	12

Таблица 2. Выработка электроэнергии в мире и доля ветроэнергетики за 2019 г.
Table 2. Worldwide electricity generation and share of wind energy in electricity generation in 2019

Страны	Выработка электроэнергии, ТВт×ч	Доля ветроэнергетики от общего производства электроэнергии, %
Китай	7 325,0	5,54
США	4 457,4	6,73
Россия	1 109,4	0,031
Дания	34,0	47
Всего	26 652,7	5,27

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, доля ветроэнергетики в энергобалансе страны мала, несмотря на высокий ветропотенциал территории РФ² (табл. 3) (Справочник..., 2007; Николаев и др., 2008; Lu Xi et al., 2009; Минин и др., 2005; Анореенко и др., 2015).

Таблица 3. Потенциал ветровой энергии континентальной части РФ и Мурманской области
Table 3. Wind energy potential of the continental part of the Russian Federation and the Murmansk Region

Источник	Ветропотенциал (млрд кВт×ч/год)					
	Валовой		Технический		Экономический	
	РФ	Мурманская область	РФ	Мурманская область	РФ	Мурманская область
Справочник..., 2007	2 609 055	44 919	52 181	112,3	260,9	0,56
Николаев и др., 2008	–	–	14 342	138,0	71,7	0,69
Lu Xi et al., 2009	–	–	116 000*	–	–	–
Минин и др., 2005	–	–	–	360,0**	–	–
См. сноску 2 ***	79 435	–	8 423	–	–	–

Примечание. * – согласно (Lu Xi et al., 2009) с учетом прибрежных территорий суммарный технический ветропотенциал РФ составляет 139 000 млрд кВт×ч/год; ** – на всей территории области со среднегодовой скоростью 4 м/с и выше при ВЭУ, расположенных на расстоянии 10 диаметров ветроколеса друг от друга; *** – ветропотенциал на высоте 30 м.

¹ Statistical Review of World Energy 2020. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>; Denmark sources record 47 % of power from wind in 2019. URL: <https://www.reuters.com/article/us-climate-change-denmark-windpower-idUSKBN1Z10KE>; Основные характеристики российской электроэнергетики. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532>.

² Особенности оценки использования ветроэнергетических ресурсов для зон централизованного и децентрализованного энергоснабжения: презентация / Г. И. Ермоленко, Ю. А. Фетисова, Б. В. Ермоленко, С. В. Киселева // VI Национальная конференция Российской Ассоциации Ветроиндустрии (РАВИ), Москва, 27 марта 2015 г. URL: energy.hse.ru/data/2015/05/29...RAWI...Ermolenko.pptx.

При проектировании ветроэлектростанций в первую очередь ориентируются на ветропотенциалы территории (Белей и др., 2018а; б; Николаев и др., 2008; Минин и др., 2005; Безруких и др., 2002).

Валовой потенциал ветровой энергии ($W_{ВП}$) – среднееголетнее годовое значение ветровой энергии движения воздушных масс над данной территорией (S).

Технический потенциал ветровой энергии ($W_{ВТ}$) – суммарная электрическая энергия, которая может быть получена от использования валового потенциала ветровой энергии при современном уровне развития техники

$$W_{ВТ} = W_{ВП} \cdot C_p \cdot \eta_r \cdot \eta_p \cdot \frac{S_T}{S}, \quad (1)$$

где C_p – коэффициент использования энергии ветра, зависящий от скорости ветра, изменяется по Жуковскому – Бетцу от 0,05 до 0,593; η_r и η_p – соответственно коэффициенты полезного действия генератора и редуктора; S_T – площадь региона, пригодная для возведения ветроустановок (ВЭУ).

Экономический потенциал ветровой энергии – величина выработки электроэнергии ВЭУ, получение которой оправдано при существующих ценах на строительные-монтажные работы, оборудование, производство, передачу электроэнергии и соблюдение экологических норм.

Оценка ветропотенциала Мурманской области

Основным источником исходных данных для оценки ветропотенциала являются длительные периоды времени наблюдения за скоростью ветра на опорной сети гидрометеослужбы. По величине среднегодовой скорости ветра в первом приближении можно судить о перспективности применения ВЭС в том или ином районе. На метеостанциях Кольского полуострова регистрирующие приборы (анемометры) располагаются на высотах от 9 до 14 м. Результаты обработки 10-летних наблюдений за скоростью ветра 37 метеорологических станций Кольского полуострова (Минин и др., 2005), полученные с учетом приведения средней многолетней скорости ветра v к сравнимым условиям с помощью поправочных коэффициентов на открытость k_o и высоту k_n , даны на рис. 1:

$$v_1 = v \cdot k_o \cdot k_n, \quad (2)$$

где v_1 – средняя многолетняя скорость ветра, приведенная к сравнимым условиям.

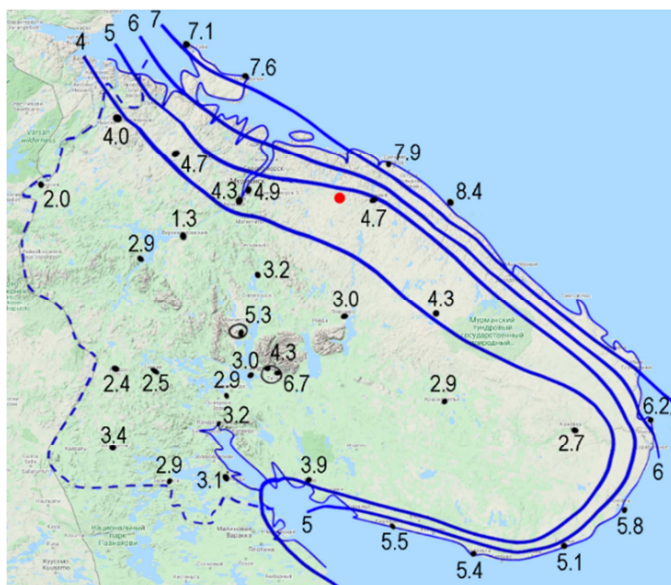


Рис. 1. Карта средних многолетних скоростей ветра Мурманской области на высоте 10 м от поверхности в условиях открытой ровной местности (Минин и др., 2005) (расположение площадки Кольской ВЭС обозначено красной точкой)

Fig. 1. Map of multi-year average wind speeds over open flat terrain at the height of 10 m above the ground (the location of the Kola wind farm is marked with a red circle)

Скорость ветра (v_2) на уровне высоты (h_2) ступицы ВЭУ описывается степенной функцией вида (Минин и др., 2005; Безруких и др., 2002):

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m. \quad (3)$$

Анализ результатов наблюдений за скоростью ветра на Мурманской телевизионной башне в приземном слое толщиной 24–140 м (Борисенко, 1974; 1977) показал, что показатель степени m может изменяться в довольно широких пределах (рис. 2).

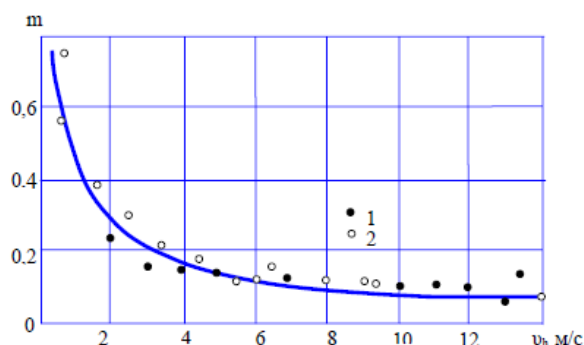


Рис. 2. Зависимость показателя степени m от скорости ветра на высоте флюгера (Минин и др., 2005)
 Fig. 2. Dependence of the exponent m on the wind speed at the height of the weather vane

Расчеты, выполненные по данным более чем 20 метеорологических станций, позволили построить зависимость среднего показателя m от среднегодовой скорости ветра (Минин и др., 2005). Эта зависимость хорошо аппроксимируется уравнением:

$$k_h = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{0,60(v_1)^{-0,77}} \quad (4)$$

В работе (Минин и др., 2005) для четырех зон Кольского полуострова рассчитаны скорости ветра и удельная энергия воздушного потока по выражениям (3–5) (табл. 4):

$$W_{\text{ВИ}}^{\text{УД}}(T) = 0,5 \cdot \rho \cdot \int_0^T v(t)^3 \cdot dt, \quad (5)$$

где T – период времени за год; ρ – плотность воздуха; $v(t)$ – скорость воздушного потока, проходящего через единицу площади поверхности, перпендикулярной вектору скорости ветра, за единицу времени, м/с.

Таблица 4. Ветровые ресурсы Кольского полуострова
 Table 4. Wind energy resources of the Kola Peninsula

Значения Зоны	Среднегодовая скорость ветра, м/с		Удельная энергия ветрового потока, МВт×ч/м ²	
	10 м	70 м	10 м	70 м
1	7,5	9,6	5,2	10,7
2	6,5	8,6	3,4	7,8
3	5,5	7,5	2,4	5,2
4	4,5	6,5	1,4	3,4

Для проведения температурно-ветрового зондирования территории РФ на высотах 100, 200, 300, 500 и 600 м в РФ существует 98 аэрологических станций (из них 2 на Кольском полуострове). В работах (Николаев и др., 2008; Андреев и др., 2015) на основе созданной базы данных ресурсов ветра³ разработаны атласы ресурсов ветровой энергии для территории РФ для высот 30, 50 и 100 м. Однако в работе (Андреев и др., 2015), также как и в презентации⁴, отмечается необходимость разработки более эффективных методов определения ветровых ресурсов, что подтверждается наличием разноречивых данных, приведенных в табл. 3. Создание эффективных методов требуется для выявления областей с богатыми ветровыми ресурсами для увеличения количества и повышения экономической эффективности ВЭС.

³ Особенности оценки использования ветроэнергетических ресурсов для зон централизованного и децентрализованного энергоснабжения : презентация / Г. И. Ермоленко, Ю. А. Фетисова, Б. В. Ермоленко, С. В. Киселева // VI Национальная конференция Российской Ассоциации Ветроиндустрии (РАВИ), Москва, 27 марта 2015 г. URL: energy.hse.ru/data/2015/05/29...RAWI...Ermolenko.pptx.

⁴ Там же.

По методике, приведенной в работе (Справочник..., 2007), для шести ветровых зон был рассчитан валовой потенциал ($W_{ВП}$) Мурманской области согласно условию полного восстановления воздушного потока после прохождения препятствия (табл. 5):

$$W_{ВП} = W_{ВП}^{уд} (T) \cdot \frac{S_T}{20}. \quad (6)$$

Таблица 5. Результаты расчета ветропотенциала Мурманской области на разных высотах
Table 5. Results of calculation of wind energy potential of the Murmansk Region at different heights

Зона	Скорость ветра на высоте 10 м, м/с	Удельная энергия воздушного потока, кВт×ч/м ²				Площадь (S_T), км ²	Валовой потенциал, млрд кВт×ч			
		10 м	50 м	100 м	150 м		10 м	50 м	100 м	150 м
1	7,0–8,4	3 145	5 817	7 446	8 795	3 840	604	1 117	1 430	1 689
2	6,0–7,0	2 330	4 757	5 992	6 990	6 798	792	1 617	2 037	2 376
3	5,0–6,0	1 358	3 136	4 748	5 747	14 092	957	2 210	3 345	4 049
4	4,0–5,0	800	2 009	2 884	3 828	30 772	1 227	3 086	4 434	5 890
5	3,0–4,0	342	1 086	1 761	2 383	52 954	905	2 876	4 662	6 309
6	1,0–3,0	88	473	990	1 524	36 444	160	862	1 804	2 777
Итого:						144 900	4 643	11 768	17 712	23 090

Эффективность Кольской ветроэлектростанции

Главным показателем эффективности Кольской ВЭС (табл. 6) является годовая выработка электроэнергии ($W_{год}$). В мире широко используется метод Рейлиха, базирующийся на использовании среднегодовой скорости ветра (v_{cp}) и зависимости мощности ВЭУ от скорости ветра:

$$W_{год} = \sum_{i=0}^T f_{y,i} \cdot P_i \cdot t, \quad (7)$$

где P_i – зависимость мощности ВЭУ от скорости ветра; $f_{y,i}$ – распределение Рейлиха для i -го промежутка времени:

$$f_{y,i} = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_i - 0,5}{v_{cp}} \right)^2} - e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_i + 0,5}{v_{cp}} \right)^2}. \quad (8)$$

Таблица 6. Основные данные о Кольской ветроэлектростанции⁵
Table 6. Basic data on the Kola wind farm

Мощность, МВт	Число ВЭУ	Тип ВЭУ (рис. 3)	Занимаемая площадь, га	Расчетная выработка энергии, млрд кВт×ч	Срок сдачи
201	57	Siemens Gamesa SG 3.4-132 (высота ступицы 154 м)	257	0,750	2021

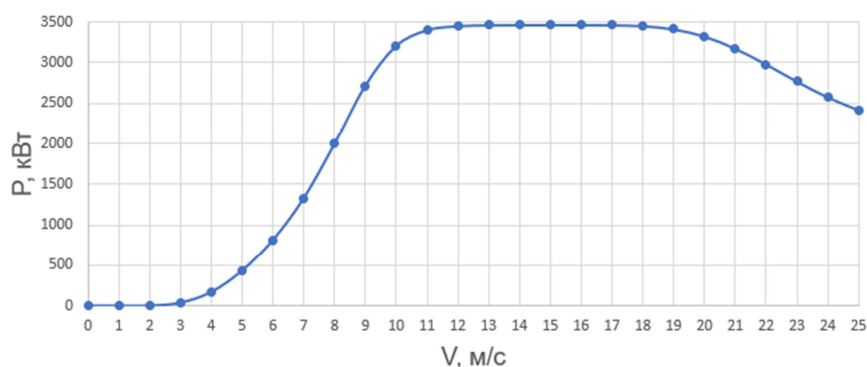


Рис. 3. Зависимость мощности SG 3.4-132 от скорости ветра⁶
Fig. 3. Power curve of SG 3.4-132

⁵ Энел Россия приступила к строительству Кольской ВЭС мощностью 201 МВт. URL: <https://www.enelrussia.ru/ru/media/press/d201909-enel-russia-construction-begins-at-201-mw-kolskaya-wind-farm-largest-renewable-project-beyond-the-arctic-circle.html>

⁶ Siemens Gamesa. URL: <https://www.siemensgamesa.com/en-int>

Важнейшим показателем эффективной работы ВЭС является коэффициент использования установленной мощности ($K_{исп}$):

$$K_{исп} = \frac{W_{год}}{(8760 - T_{простоя}) \cdot P_n}, \quad (9)$$

где $T_{простоя}$ – число часов вынужденного аварийного простоя, ч.

Расчет годовой выработки электроэнергии ВЭС проводился по методике, разработанной и приведенной в работе (Белей и др., 2011) и основанной на использовании метода Рейлиха и технических данных всего класса ВЭУ:

$$W_{год} = K_{исп} \cdot K_B \cdot n \cdot P_{ном} \cdot T_{год}, \quad (10)$$

где $K_{исп}$ – коэффициент использования установленной мощности ВЭУ (рис. 4); K_B – коэффициент, учитывающий взаимное влияние ВЭУ; n – число ВЭУ.

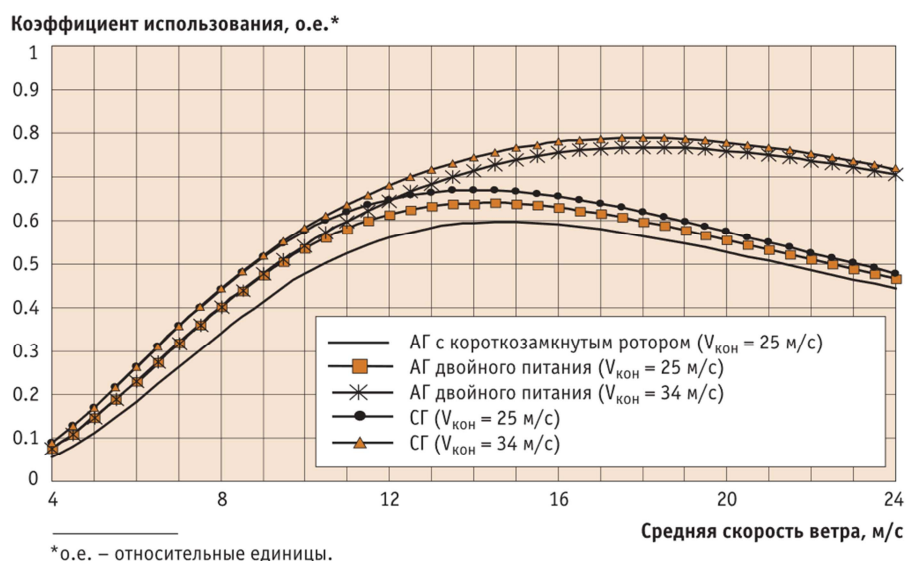


Рис. 4. Зависимости коэффициента использования установленной мощности ВЭУ от среднегодовой скорости ветра на уровне ступицы ветроколеса (Белей и др., 2011)

Fig. 4. Dependences of wind farm capacity factor on multi-year average wind speed at the hub height

По приведенной выше методике был рассчитан ветропотенциал территорий различных ветровых зон, определенных по изолиниям средних скоростей ветра (рис. 1) Мурманской области (табл. 7). Также представляется важным оценить выработку электроэнергии Кольской ВЭС при ее расположении в разных ветровых зонах (табл. 8).

Таблица 7. Результаты расчета ветропотенциала территории и годовой выработки электроэнергии Кольской ВЭС

Table 7. Results of calculation of gross wind energy potential of the site of the Kola wind farm and its annual electricity generation

Высота, м	Скорость ветра, м/с	Валовой потенциал, млрд кВт×ч	Годовая выработка электроэнергии, млрд кВт×ч	Коэффициент использования установленной мощности
10	4,7	2,239	–	–
50	6,3	5,891	–	–
100	7,2	8,908	–	–
154	7,7	11,546	0,657	0,39 ($T_{простоя} = 0$)

Таблица 8. Годовая выработка электроэнергии Кольской ВЭС при ее расположении в разных ветровых зонах Мурманской области

Table 8. Annual electricity generation of the Kola wind farm in case of its relocation to different wind zones of the Murmansk Region

Ветровая зона	Скорость ветра, м/с		Годовая выработка электроэнергии, млрд кВт×ч	Коэффициент использования установленной мощности
	На высоте 10 м	На уровне ступицы ВЭУ		
1	8,0	11,1	1,021	0,6
2	6,5	9,6	0,891	0,52
3	5,5	8,6	0,761	0,45
4	4,5	7,5	0,623	0,37
5	3,5	6,5	0,476	0,28
6	2,0	5,2	0,277	0,16

Согласно⁷ (п. 2.3.2.5) следует, что не всегда большие значения средней годовой скорости являются гарантией высокой выработки электроэнергии ВЭУ. С этой позицией следует согласиться, так как среднегодовая скорость ветра не в полной мере учитывает всей совокупности характеристик ветра: суточный ход ветра, распределение ветровых периодов и периодов затиший по длительности и т. д. (*Справочник...*, 2007; *Николаев и др.*, 2008; *Безруких и др.*, 2002). Поэтому на стадии предпроектных работ следует рассчитать годовую выработку электроэнергии на основе данных метеорологической станции в месте установки ВЭС:

$$W_{\text{год}} = \sum_{t=0}^T P_i \cdot t_i, \quad (11)$$

где P_i и t_i – соответственно мощность ВЭУ при данной скорости ветра (рис. 4) и время работы при данной мощности.

Пример исходных данных в виде ежедневных наблюдений метеостанции приведен на рис. 5.

Название	Дата	Температура воздуха					Влажность воздуха		Эффективная температура			Ветер		Миним. видим.	Атмосферное давление						Облачность		Осадки		
		Т ср (°C)	dT ср (°C)	adj dT ср (°C)	Т мин (°C)	Т макс (°C)	f ср (%)	f мин (%)	Те мин (°C)	Те макс (°C)	Тес макс (°C)	ср (м/с)	порыв (м/с)		Р ср (гПа)	Р мин (гПа)	Р макс (гПа)	Ро ср (гПа)	Ро мин (гПа)	Ро макс (гПа)	общ. балл	нижн. балл	ночь мм	день мм	сумма мм
Туманная	01.01.2019	-7.8	+1.9		-12.1	-2.6	84	70	-12	-12	-12	2,5	6	10 км	992.4	987.8	998.4	978.0	973.3	984.0	9.7		1	3	4.0

Рис. 5. Пример данных ежедневных наблюдений метеостанции

Fig. 5. An example of daily observations of a weather station

Годовая выработка Кольской ВЭС для места подключения, определенная по формулам (3, 11) и рис. 3 на основании расчетов по данным 10 лет наблюдений, приведена в табл. 9.

Таблица 9. Сравнение результатов расчетов годовой выработки электроэнергии Кольской ВЭС

Table 9. Comparison of calculation results of annual electricity generation of the Kola wind farm

Годовая выработка электроэнергии Кольской ВЭС, млрд кВт×ч		
Результаты, полученные специалистами из Группы Enel	Результаты, полученные по формуле (10)	Результаты, полученные по формуле (11)
0,750	0,657	0,636

Результаты расчетов выработки электроэнергии Кольской ВЭС по разным методикам для высоты ступицы ВЭУ, равной 154 м, отличаются примерно в 15 %, что свидетельствует о достоверности расчетов с инженерной точки зрения.

⁷ РД 52.04.275-89. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок.

Оценка подключения и совместной работы Кольской ВЭС в составе энергосистемы Мурманской области

На рис. 6 и в табл. 10 приведены электрическая схема с Кольской ВЭС и состав генерирующих мощностей Мурманской энергосистемы⁸.

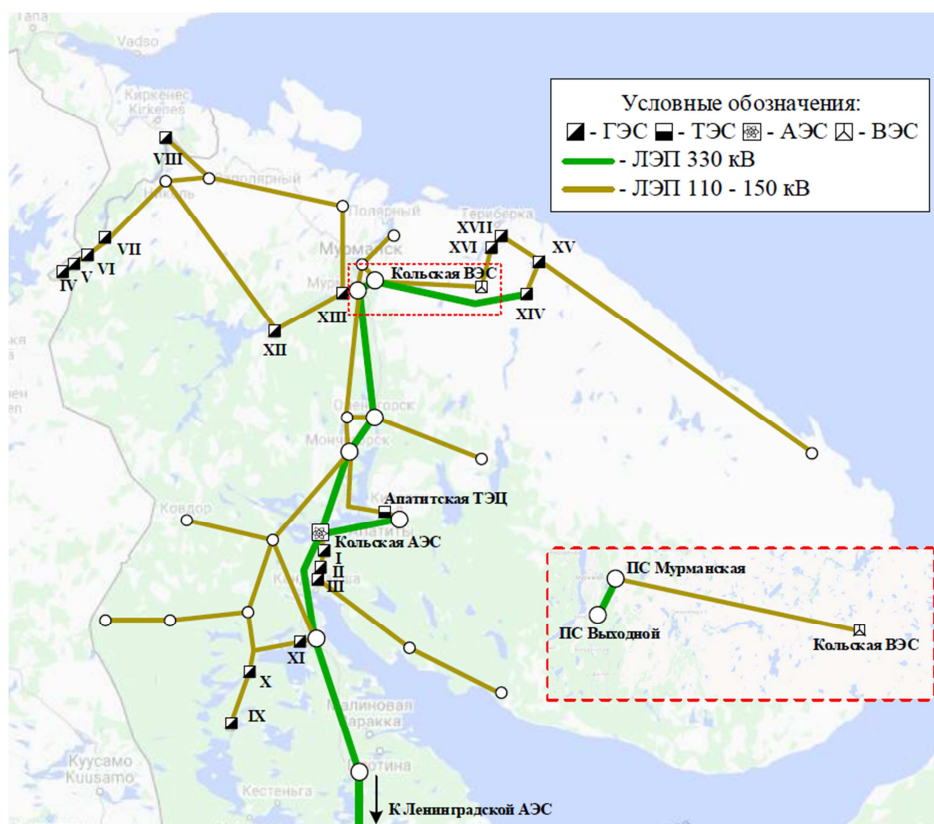


Рис. 6. Упрощенная схема электрических сетей энергосистемы Мурманской области: I – III: Нивский каскад; IV – VIII: Пазский каскад; IX–XI: Ковдинский каскад; XII–XIII: Туломский каскад; XIV–XV: Серебрянский каскад; XVI–XVII: Териберский каскад
Fig. 6. Simplified map of the power system of the Murmansk Region

Таблица 10. Действующие электростанции энергосистемы Мурманской области
Table 10. Operating power plants of the power system of the Murmansk Region

Наименование	Установленная мощность, МВт
Кольская АЭС	1 760
Серебрянский каскад	357
Ковдинский каскад	328
Туломский каскад	324
Нивский каскад	240,4
Апатитская ТЭЦ	230
Пазский каскад	187,6
Териберский каскад	156,5
Мурманская ТЭЦ	12
ТЭЦ АО "Ковдорский ГОК"	8
Итого:	3 603,5

В настоящее время в РФ действует 4 государственных стандарта в области ветроэнергетики (табл. 11), а также ряд стандартов организаций.

⁸ Об утверждении Схемы и программы развития электроэнергетики Мурманской области на период 2021–2025 гг. URL: <https://minenergo.gov-murman.ru/documents/npa/tek/reg/>.

Таблица 11. Российские стандарты в области ветроэнергетики
Table 11. Russian technical standards in the field of wind power

№	№ стандарта	Наименование стандарта
1	ГОСТ Р 51237-98	Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения
2	ГОСТ Р 51990-2002	Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация
3	ГОСТ Р 51991-2002	Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования
4	ГОСТ Р 58491-2019	Технические требования к объектам генерации на базе ветроэнергетических установок

Из приведенных выше стандартов только ГОСТ Р 58491-2019 регламентирует ряд требований по подключению и работе ВЭУ и ВЭС как в составе Единой энергетической системы России, так и изолированных электроэнергетических систем: по допустимой длительности работы ВЭС в различных диапазонах частот, напряжений (табл. 12), регулировании активной и реактивной мощностей и прочее.

Таблица 12. Допустимые напряжения сети для работы ВЭС в составе энергосистемы
Table 12. Permissible voltage range for the operation of the wind farm as a part of the power system

Номинальное напряжение, кВ	Аварийно допустимое напряжение, кВ	Минимально допустимое напряжение, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ
110	84,7	88,5	126
220	169,4	177,1	252
330	254,1	265,65	363
500	385	402,5	525
750	577,5	603,75	787

В странах Европы и Северной Америки разработаны нормативные документы, регламентирующие проведение оценки подключения и работы ВЭС (Белей и др., 2011; 2018а; б). В соответствии с этими нормативами оценка должна основываться на комплексном расчете перетоков мощности, изменениях напряжения при коммутациях, расчете токов короткого замыкания, оценке уровней дозы фликера и высших гармоник.

Выполнение ряда вышеизложенных требования к работе ВЭС можно рассмотреть на основании расчетов в программном обеспечении NEPLAN (табл. 13). Была разработана модель энергосистемы Мурманской области, основанная на линиях электропередачи 150 и 330 кВ. Достоверность модели проверена сравнительными расчетами на модели и рядом режимов работы энергосистемы, представленных в открытом доступе⁹. В качестве балансирующего узла принята связь от Ленинградской АЭС по двум ЛЭП напряжением 330 кВ (рис. 6).

Таблица 13. Результаты расчетов на модели перетоков мощностей в энергосистеме Мурманской области при различных режимах Кольской ВЭС
Table 13. Results of the Murmansk Region's powerflow calculation for different operation modes of the wind farm

Режим	От подстанции	Величина перетока, МВт + МВАр	К подстанции
До подключения Кольской ВЭС	Кольская ВЭС	–	Мурманская (348,3 кВ)
	Выходной (348,7 кВ)	8,5 + j76,4	Мурманская (348,3 кВ)
После подключения Кольской ВЭС, выдача реактивной мощности	Кольская ВЭС (152,8 кВ)	197,3 + j9,8	Мурманская (353,7 кВ)
	Мурманская (353,7 кВ)	188,6 – j65,3	Выходной (354,0 кВ)
После подключения Кольской ВЭС, потребление реактивной мощности	Кольская ВЭС (143,2 кВ)	200,8 – j63,5	Мурманская (345,3 кВ)
	Мурманская (345,3 кВ)	193,3 – j128,7	Выходной (345,9 кВ)

На Кольской ВЭС используются асинхронные генераторы (АГ) двойного питания (рис. 7). Что касается использования АГ с двойным питанием, то благодаря применению полупроводникового преобразователя меньшей мощности (около 30 % от мощности генератора) существенно снижается стоимость таких ВЭУ

⁹ Об утверждении Схемы и программы развития электроэнергетики Мурманской области на период 2021–2025 гг. URL: <https://minenergo.gov-murman.ru/documents/npa/tek/reg/>.

и потери электроэнергии. В результате при достаточно высоких средних скоростях ветра (более 7,5 м/с) ВЭУ на основе асинхронных генераторов двойного питания чуть более эффективны (Белей и др., 2013).

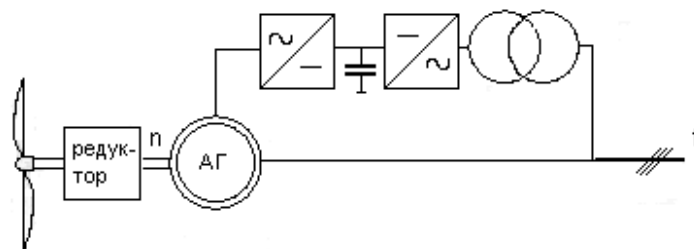


Рис. 7. Электрическая схема асинхронного генератора двойного питания, реактивная мощность регулируется, $n \approx 60 \times (0,8 - 1,2) \times f/p$
Fig. 7. Circuit of a double-fed asynchronous generator, reactive power is adjustable, $n \approx 60 \times (0,8 - 1,2) \times f/p$

Анализ результатов расчетов на модели показывает: 1) отсутствует перегрузка линий электропередачи 150 и 330 кВ при включении Кольской ВЭС (табл. 14); 2) выдача или потребление реактивной мощности ВЭС обеспечивает регулирование напряжения в узлах подключения ВЭС к энергосистеме.

Таблица 14. Пропускная способность и дальность передачи ЛЭП 110–330 кВ
Table 14. 110–330 kV power transmission line capacity and transmission range

Напряжение ЛЭП, кВ	Сечение проводов, мм ²	Передаваемая мощность, мВт		Длина ЛЭП, км	
		натуральная	при плотности тока 1,1 А/мм ²	предельная при КПД = 0,9	средняя (между 2 ПС)
110	70–240	30	13–45	80	25
150	150–300	60	38–77	250	50
330	2×240–2×400	360	270–450	700	130

Заключение

С использованием данных многолетних наблюдений за скоростями ветра в Мурманской области рассчитан валовой ветропотенциал региона для шести зон ветровой активности с высотой флюгера 10, 50, 100 и 150 м. Определен ветропотенциал территории и годовая выработка электроэнергии Кольской ветроэлектростанции, дана оценка ее эффективности. Годовую выработку электроэнергии Кольской ВЭС можно было бы увеличить при ее размещении в зоне с более высокой ветровой активностью. Расчеты режимов работы Кольской ВЭС в составе энергосистемы Мурманской области, выполненные на математической модели, показали, что уровни напряжений в узлах энергосистемы и перетоки мощностей в эксплуатационных режимах Кольской ВЭС находятся в рамках допустимых нормативными документами значений. Показана эффективность регулирования реактивной мощности ВЭС.

Библиографический список

- Андреев Т. И., Габдрахманова Т. С., Данилова О. В., Ермоленко Г. В. [и др.]. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России. М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. 160 с.
- Безруких П. П., Арбузов Ю. Д., Борисов Г. А., Виссарионов В. И. [и др.]. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России : монография / под общ. ред. П. П. Безруких. СПб. : Наука, 2002. 314 с.
- Белей В. Ф., Задорожный А. О. Ветроэнергетика России: анализ состояния и перспективы развития // Энергия: экономика, техника, экология. 2018а. № 7. С. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.31857/s023336190000343-3>.
- Белей В. Ф., Задорожный А. О. Ветроэнергетика России: анализ состояния и перспективы развития // Энергия: экономика, техника, экология. 2018б. № 8. С. 2–15. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0233361900001293-8>.
- Белей В. Ф., Никишин А. Ю. Ветроэнергетика России: анализ научно-технических и правовых проблем // Электричество. 2011. № 7. С. 7–14.
- Белей В. Ф., Никишин А. Ю. Современные ветроэнергетические установки в составе электроэнергетической системы // Энергия единой сети. 2013. № 5(10). С. 60–69.
- Белей В. Ф., Харцфельд Э. Анализ технических решений по реализации ветропотенциала России // Балтийский морской форум : материалы VII Междунар. Балтийского морского форума : в 6 т. Том. 1. Калининград, 7–12 октября 2019 г. Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО "КГТУ", 2019. С. 746–754.

- Борисенко М. М. Вертикальные профили ветра и температуры в нижних слоях атмосферы // Труды Главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. Л. : Гидрометеиздат, 1974. Вып. 320. 205 с.
- Борисенко М. М. Распределение ветра в нижнем 200-метровом слое атмосферы над городом // Труды Главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. Л. : Гидрометеиздат, 1977. Вып. 368. 151 с.
- Минин В. А., Дмитриев Г. С., Иванова Е. А., Морoshкина Т. Н. [и др.]. Ресурсы ветровой энергии Мурманской области и возможности их промышленного использования : препринт. Апатиты : Фил. КНЦ РАН – Центр физ.-техн. проблем энергетики Севера : КНЦ РАН, 2005. 48 с.
- Николаев В. Г., Ганага С. В., Кудряшов Ю. И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. М. : Атмограф, 2008. 584 с.
- Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / сост. : Безруких П. П. и др. Москва : ИАЦ Энергия, 2007. 272 с.
- Lu Xi, McElroy M. B., Kiviluoma J. Global potential for wind-generated electricity // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). 2009. Vol. 106, Iss. 27. P. 10933–10938. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0904101106>.

References

- Andreenko, T. I., Gabderakhmanova, T. S., Danilova, O. V., Ermolenko, G. V. et al. 2015. Atlas of renewable energy resources on the territory of Russia. Moscow. (In Russ.)
- Bezrukikh, P. P., Arbuzov, Yu. D., Borisov, G. A., Vissarionov, V. I. et al. 2002. Resources and effectiveness of use of renewable energy resources in Russia. Monograph. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Beley, V. F., Zadorozhniy, A. O. 2018a. Wind energy of Russia: Analysis of the state and development perspectives. *Energiia: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 7, pp. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.31857/s023336190000343-3>. (In Russ.)
- Beley, V. F., Zadorozhniy, A. O. 2018b. Wind energy of Russia: Analysis of the state and development perspectives. *Energiia: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 8, pp. 2–15. DOI: <https://doi.org/10.31857/s023336190001293-8>. (In Russ.)
- Beley, V. F., Nikishin, A. Yu. 2011. Wind energy of Russia: analysis of scientific, technical and legal problems. *Elektrichestvo*, 7, pp. 7–14. (In Russ.)
- Beley, V. F., Nikishin, A. Yu. 2013. Modern wind-driven turbines. *Energiya edinoi seti*, 5(10), pp. 60–69. (In Russ.)
- Beley, V. F., Harzfeld, E. 2019. Analysis of technical solutions for implementation wind potential of Russia. *Proceedings of the VII Intern. Baltic Maritime Forum*. 7–12 October, 2019. Kaliningrad, pp. 746–754. (In Russ.)
- Borisenko, M. M. 1974. Vertical profiles of wind and temperature in lower atmospheric layers. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii imeni A. I. Voyeykova*. Leningrad, Iss. 320. (In Russ.)
- Borisenko, M. M. Wind distribution in lower 200 m atmospheric layer above a city. 1977. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii imeni A. I. Voyeykova*. Leningrad, Iss. 368. (In Russ.)
- Minin, V. A., Dmitriev, G. S., Ivanova, E. A., Moroshkina, T. N. et al. 2005. Resources of wind energy of the Murmansk Region and prospects of their industrial use. Apatity. (In Russ.)
- Nikolayev, V. G., Ganaga, S. V., Kudryashov, Yu. I. 2008. National cadaster of wind energy resources of Russia and methodical framework of their assessment. Moscow. (In Russ.)
- Reference book of Russian renewable energy resources and local fuel types (indicators by territories). 2007. Eds. Bezrukikh P. P. et al. Moscow. (In Russ.)
- Lu, Xi, McElroy, M. B., Kiviluoma, J. 2009. Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 106(27), pp. 10933–10938. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0904101106>.

Сведения об авторах

Белей Валерий Феодосиевич – Советский пр., 1, г. Калининград, Россия, 236022; Калининградский государственный технический университет, д-р техн. наук, профессор; e-mail: vbeley@klgtu.ru

Valeriy F. Beley – 1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022; Kaliningrad State Technical University, Dr Sci. (Engineering), Professor; e-mail: vbeley@klgtu.ru

Коцарь Герман Владимирович – Советский пр., 1, г. Калининград, Россия, 236022; Калининградский государственный технический университет, студент; e-mail: german.kotsar@gmail.com

German V. Kotsar – 1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022; Kaliningrad State Technical University, Student; e-mail: german.kotsar@gmail.com