

УДК 622:621.31

РАЗВИТИЕ КОЛЬСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В ИНТЕРЕСАХ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ



Н. М. КУЗНЕЦОВ,
ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук,
kuzn55@mail.ru



В. А. МИНИН,
зав. лабораторией, канд. техн. наук



В. Н. СЕЛИВАНОВ,
директор, канд. техн. наук

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Введение

Разработка перспективных направлений развития энергетики в Арктических регионах требует выполнения технико-экономического анализа функционирования централизованной и автономных систем энергоснабжения на основе прогноза динамики потребления топливно-энергетических ресурсов. Для рационального освоения территорий российской Арктики [1] необходимо обеспечить рост экономики, решить социальные и транспортно-инфраструктурные задачи развития арктических территорий [2, 3].

Основу экономики Мурманской области составляет сырьевая промышленность, наиболее энергоемкими отраслями являются черная и цветная металлургия, горно-химическая промышленность [4]. Реализация технологических процессов на этих предприятиях обуславливает потребление большого количества топливно-энергетических ресурсов [5, 6]. Основную долю баланса топливно-энергетических ресурсов составляет привозное топливо – уголь, топочный мазут, ядерное топливо, которое используется при выработке тепловой и электрической энергии и в технологических производственных процессах. Повышение цены на топливно-энергетические ресурсы определяет рост

Представлена схема электрических сетей Кольской энергосистемы. Показана динамика потребления электрической энергии в Мурманской области. Рассмотрена возможность экономии энергии на источниках ее производства, в распределительных сетях, на промышленных предприятиях, в бюджетной сфере и жилищно-коммунальном секторе. Рассмотрено изменение структуры топливно-энергетического баланса при развитии горнопромышленного комплекса в регионе.

Ключевые слова: горнопромышленный комплекс, энергетическая система, гидроэнергетика, ветроэнергетика, приливная энергия, энергосбережение, энергетические ресурсы.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.14

тарифов на них. В последнее время возросло внимание к использованию на котельных угля, стоимость которого ниже по сравнению с мазутом. Однако калорийность угля ниже мазута, что увеличивает объемы поставок и повышает нагрузку на железнодорожный транспорт, а также способствует расширению вредного воздействия на окружающую среду.

Схема электрических сетей

В Кольскую энергетическую систему входят семнадцать гидроэлектростанций, две тепловые электростанции, атомная и приливная электростанции, которые соединены высоковольтной электрической сетью (рис. 1). По воздушным линиям электропередачи 330 кВ электроэнергия подается в энергетическую систему Республики Карелия.

По распределительным электрическим сетям напряжением 35, 110 и 150 кВ электроэнергия поступает на предприятия промышленности и объекты жилищно-коммунального сектора, а также экспортируется в соседние страны.

Расход электрической энергии потребителями Мурманской области с 2010 г. стабильный и находится на уровне 12,5 млрд кВт·ч.

Обеспечение потребителей региона электрической и тепловой энергией осуществляется централизованно. Для повышения эффективности электроснабжения потребителей горнопромышленного комплекса и социальной сферы ведут научные исследования по разработке методов повышения надежности работы высоковольтных линий электропередачи в условиях влияния внешних электромагнитных воздействий [7, 8].

В регионе имеется значительный потенциал энергосбережения, который составляет на источниках производства электрической и тепловой энергии более 32 %, в распределительных

сетях – около 18 %, на предприятиях промышленности – 9 %, в бюджетной сфере и жилищном секторе – более 40 %. По изменению интегрального показателя энергосбережения и энергоэффективности (энергоёмкость валового регионального продукта) можно сделать вывод об эффективности внедрения в регионе современных технологий экономии энергетических ресурсов. Уменьшение энергоёмкости валового регионального продукта с 2012 по 2020 г. составит 20 % (с 30,9 до 25,2 кг у. т/тыс. руб.).

Структура топливно-энергетического баланса

Потребление топливно-энергетических ресурсов предприятиями и сферой жилищно-коммунального хозяйства в области составляет более 10 млн т у. т., 40 % из которого приходится на ядерное топливо атомной электростанции. Гидроэнергетические ресурсы составляют 22 %, остальные 38 % приходятся на мазут, уголь, нефтепродукты, сжиженный газ. Привозное топливо используется котельными и тепловыми станциями, а тепловая и электрическая энергия расходуется на технологические нужды в технологических переделах горно-обогатительных предприятий и жилищно-коммунальном секторе. Основная доля электроэнергии в топливно-энергетическом балансе вырабатывается на атомной станции и гидроэлектростанциях, что значительно снижает нагрузку на железнодорожный транспорт по доставке угля и нефтепродуктов, а также улучшает экологическую ситуацию в области.

Мурманская область относится к числу районов с высоким уровнем потребления электрической энергии, которое определяется большой энергоёмкостью горно-обогатительных производств и предприятий цветной металлургии. Потребление энергии здесь составляет около 2/3 от суммарного ее расхода в регионе. Рост электропотребления будет происходить при развитии Мурманского транспортного узла и освоении газоконденсатных месторождений прибрежной зоны [9].

Использование электрической энергии для выработки тепловой энергии приведет к изменению структуры потребления топливно-энергетических ресурсов в регионе и снижению экологической нагрузки. Для расширения поставок энергии для нужд Республики Карелия строится линия электропередачи, которая позволит удвоить объемы передачи электроэнергии. Имеется возможность увеличения экспортных поставок электроэнергии в соседние Скандинавские страны.

Для реализации проекта по развитию Мурманского транспортного узла ведут строительство комплекса электроснабжения подстанции «Лавна-тяговая», который включает в себя сооружение высоковольтных линий электропередачи напряжением 150 кВ

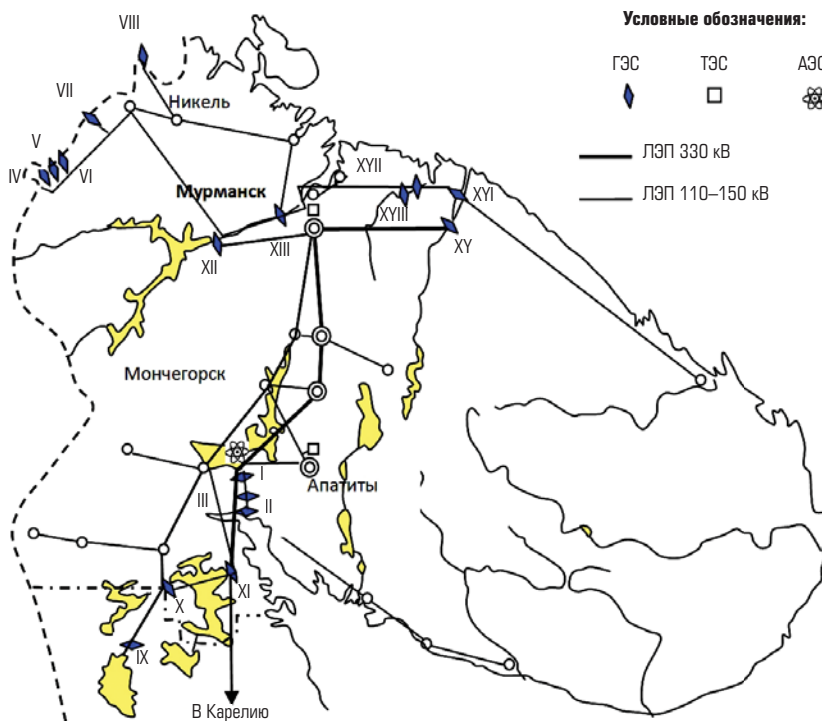


Рис. 1. Схема электрических сетей Кольской энергосистемы:

I–III и IX–XI – Нивские ГЭС; IV–VIII – Пазские ГЭС; XII–XIII, XV–XVIII – Туломские и Серебрянские ГЭС

протяженностью около 30 км. Нагрузка энергетической системы увеличилась на 56,4 МВт и в перспективе возрастет еще на 40 МВт. Ввод в эксплуатацию данной линии электропередачи позволит обеспечить надежность региональной энергетической системы, создать предпосылки для организации новых рабочих мест, улучшить перспективы дальнейшего развития горнопромышленного комплекса. При реализации проекта по развитию Мурманского транспортного узла было построено более 56 км линий электропередачи, проведена масштабная реконструкция действующих линий: впервые на северо-западе страны энергетики смонтировали 335 км инновационного термостойкого провода российского производства с повышенной пропускной способностью и устойчивостью к гололеду и ветровым нагрузкам.

Использование подстанции напряжением 330 кВ создает дополнительные благоприятные условия для развития экономики Мурманской области, а также обеспечивает электроснабжение угольного терминала «Лавна», одноименной тяговой подстанции Октябрьской железной дороги. В настоящее время построены заходы воздушной линии 330 кВ «Серебрянская ГЭС-1 – Выходной» протяженностью около 9 км. На подстанции установлены современные микропроцессорные терминалы релейной защиты, внедрена новейшая автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии. Основное электрооборудование произведено в России, включая автотрансформатор мощностью 250 МВ·А. Полностью сооружение подстанции будет завершено в 2025 г. Планируется установка второго автотрансформатора мощностью 250 МВ·А.

Подстанция напряжением 330 кВ «Мурманская» станет вторым по мощности центром питания Мурманской области, который позволит разгрузить действующую подстанцию 330 кВ «Выходной». Этот энергообъект планируют задействовать в схеме выдачи в энергосистему 200 МВт мощности Кольской ветроэлектрической станции (ВЭС). Ввод в работу подстанции 330 кВ «Мурманская» создает условия для реализации проектов, связанных с развитием Северного морского пути и торгового порта «Лавна». Внедрение мероприятий по комплексному развитию Мурманского транспортного узла, в том числе строительство угольного терминала «Лавна» и объектов федеральной собственности, позволит увеличить объемы перевалки грузов на 18 млн т (прирост на 27,8 %).

В целом реализация рассмотренных мероприятий по реконструкции энергетической системы даст возможность создать на территории региона высокотехнологичный электросетевой комплекс на базе современных технологий.

Развитие энергетики Мурманской области долгие годы осуществлялось за счет строительства гидроэлектростанций. Наиболее эффективные гидроэнергетические ресурсы в настоящее время освоены. Имеется возможность сооружения малых гидроэлектростанций и микрогидроэлектростанций [10], которые могут использоваться при электрификации удаленных потребителей энергии.

Потенциал ветроэнергетики [11] связан с прибрежными районами территории Мурманской области. Это перспективный источник экологически чистой энергии. На северном побережье Кольского полуострова возможно строительство ветропарков, которые могут быть расположены недалеко от существующих гидроэлектростанций и объединены с энергетической системой. Установленная мощность ветрогенераторов может составить около 400 МВт.

Высокая скорость ветра, максимальная его интенсивность в зимний период, наличие в энергетической системе гидроэлектростанций, позволяющих аккумулировать энергию воды при работе ветрогенераторов, являются благоприятными предпосылками для применения ветроэнергетических установок [9]. При этом необходимо проводить научные исследования по следующим направлениям:

- моделированию реальной скорости ветра на высоте ветрогенератора по метеорологическим прогнозам [12] и определению параметров выходной мощности ветряных турбин на основе плотности мощности ветра [13];
- повышению надежности ветрогенератора, лопастей и других механических деталей при ударах молнии [14];
- оценке влияния скорости вращения лопасти ветротурбины на систему молниезащиты ветроустановки [15].

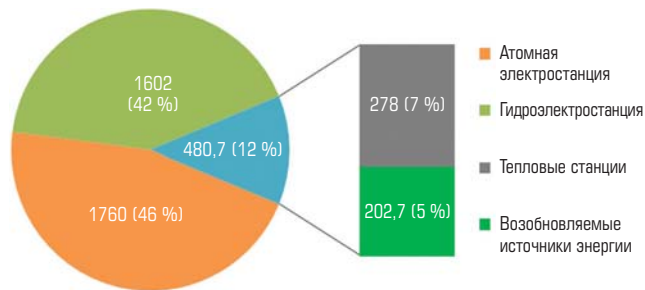


Рис. 2. Установленная мощность источников электроэнергии, МВт

При развитии системной ветроэнергетики и малой гидроэнергетики доля возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом балансе увеличится до 5 % и будет соответствовать планируемым показателям развития этих видов энергетики в Российской Федерации.

Имеются перспективы использования энергии морских приливов для экономики Мурманской области. ОАО «РусГидро» на Кислогубской приливной электростанции проведены испытания ортогонального рабочего колеса гидроагрегата диаметром 5 м мощностью 1,1 МВт. Это позволило осуществить проектирование Северной приливной электростанции в створе Губы Долгой на побережье Кольского полуострова. Установленная мощность Лумбовской приливной электростанции может составлять около 600 МВт. Энергия приливов является неравномерной в течение суток, но может быть использована при параллельной работе с объектами гидроэнергетики на реках, что позволит

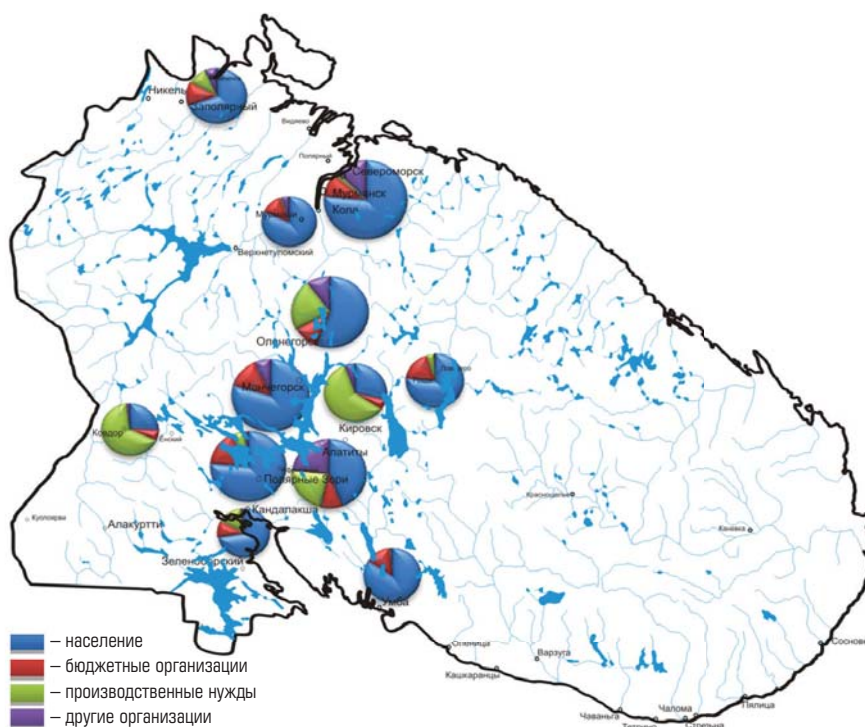


Рис. 3. Потребление тепловой энергии населенными пунктами

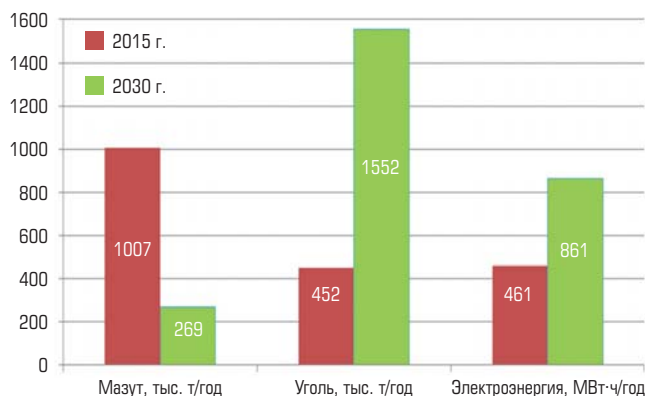


Рис. 4. Использование энергоресурсов для выработки теплотенергии в Мурманской области

регулировать нагрузку в электроэнергетической системе в часы максимального потребления электроэнергии предприятиями.

Большое значение в развитии энергетики региона имеет энергосбережение. С его помощью возможно удовлетворить значительную часть потребности в генерирующих мощностях. Большая часть потенциала распределенной генерации в настоящее время не используется, мощность установок на возобновляемых источниках энергии составляет менее 0,1 % установленной мощности всех электростанций [16]; 46 % установленной мощности приходится на атомную электростанцию, доля гидроэлектростанций составляет 42 % (рис. 2). После завершения строительства ветропарка мощностью 200 МВт доля возобновляемой энергии в суммарной установленной мощности энергосистемы возрастет до 5 %.

Теплоэнергетическое хозяйство региона обеспечивает тепловой энергией промышленные предприятия, города и населенные пункты области [9]. Высокий уровень морального и физического износа оборудования источников и сетей теплоснабжения увеличивает затраты на их обслуживание и ремонт. Эффективность использования топлива находится на низком уровне, отсутствуют приборный учет и регулирование потребления тепловой энергии. Поставки угля, мазута, дизельного топлива в Мурманскую область осуществляются на расстояние более 1500 км. Большая транспортная составляющая в стоимости топлива и рыночная система ценообразования на него обуславливают необходимость предоставления теплогенерирующим предприятиям субсидии на компенсацию расходов. В последнее время указанным проблемам уделяется значительное внимание при комплексной модернизации систем теплоснабжения и оптимизации структуры топливного баланса для уменьшения бюджетных расходов в муниципалитетах [5].

Структура потребления тепловой энергии населением, бюджетными организациями и промышленными предприятиями в городах и поселках области показана на рис. 3.

Основная доля топлива в структуре потребления топливно-энергетических ресурсов в Мурманской области приходится на мазут [5] (рис. 4). К 2030 г. рассматривают варианты расширения использования угля для выработки теплотенергии и увеличения в два раза доли электроэнергии в структуре установленной тепловой мощности.

Это позволит уменьшить условно-постоянные расходы при выработке тепловой энергии и увеличить коэффициент использования установленной мощности источников тепловой энергии с 19 до 26 %.

Надежное энергоснабжение потребителей имеет большое значение для обеспечения эффективного функционирования экономики Мурманской области, которое достигается реализацией мероприятий по экономии энергии, переходу к новой архитектуре энергетической системы с использованием распределенной энергетики, цифровизации, интеллектуализации систем энергоснабжения, увеличению доли распределенной генерации в энергетическом балансе с активным вовлечением потребителей в управление спросом на электроэнергию. Интеграция распределенной генерации на возобновляемых источниках энергии для развития и функционирования энергетической системы [17] требует разработки концепции работы виртуальных электростанций [18], направленной на объединение генерирующих источников, накопителей энергии и активных потребителей. Виртуальные электростанции должны координировать распределение мощности в энергосистеме, управление напряжением, реактивной мощностью и частотой колебаний в системе при изменении электропотребления [19–21].


Заключение

Для снижения энергоемкости валового регионального продукта и повышения энергетической эффективности в Мурманской области предусматриваются использование возобновляемых источников энергии, модернизация энергетических установок, внедрение энергосберегающих материалов и технологий. Переход от традиционной организации энергетической системы к новым технологиям интеллектуального управления энергетическими сетями будет осуществляться с использованием распределенной энергетики.

Основными направлениями совершенствования региональной электроэнергетики станут развитие сетевой инфраструктуры и генерирующих мощностей, управление спросом на электрическую энергию, формирование благоприятных инвестиционных условий для строительства объектов энергетики.

Библиографический список

1. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации»: Постановление Правительства РФ от 21.04.2014 № 366 (с изм. на 31.03.2020). URL: <http://docs.cntd.ru/document/499091750> (дата обращения: 15.06.2020).
2. Лексин В. Н., Порфирьев Б. Н. Переосвоение российской Арктики как предмет системного исследования и государственного программно-целевого управления: вопросы методологии // Экономика региона. 2015. № 4(44). С. 9–20.
3. Мельников Н. Н. Роль Арктики в инновационном развитии экономики России // Горный журнал. 2015. № 7. С. 23–27. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.04
4. Лукичев С. В., Жиров Д. В., Чуркин О. Е. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого комплекса Мурманской области // Горный журнал. 2019. № 6. С. 19–24. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.01
5. Ключин А. М., Кузнецов Н. М., Трибуналов С. Н. Повышение эффективности использования энергоресурсов в Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 5-13(39). С. 107–118.

6. Шуцкий В. И., Кузнецов Н. М., Токарева Е. А., Фишук С. А. Анализ и прогнозирование энергопотребления в Мурманской области // Промышленная энергетика. 1998. № 10. С. 5–9.
7. Ефимов Б. В., Селиванов В. Н. Комплексные исследования внешних воздействий на электрические сети Кольского энергосистемы // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 2(28). С. 34–40.
8. Морозов И. Н., Кузнецов Н. М., Белова Л. А., Бороздина Е. Д. Исследование нестационарных режимов электрической подстанции напряжением 110 кВ с использованием имитационного моделирования в среде Matlab // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 113–122.
9. Минин В. А. Перспективы внедрения возобновляемых источников энергии в топливно-энергетический баланс Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 5(12). С. 106–112.
10. Минин В. А., Коновалова О. Е., Иванова Е. А. Перспективы использования микро-ГЭС в удаленных районах севера // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 3(14). С. 62–68.
11. Minin V. A., Furtaev A. I. Wind potency in the western sector of the Russian Arctic and its possible uses // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 302. 012067. DOI: 10.1088/1755-1315/302/1/012067
12. Fischer A., Montuelle L., Mougeot M., Picard D. Statistical learning for wind power: A modeling and stability study towards forecasting // Wind Energy. 2017. Vol. 20. Iss. 12. P. 2037–2047.
13. Qinkai Han, Sai Ma, Tianyang Wang, Fulei Chu. Kernel density estimation model for wind speed probability distribution with applicability to wind energy assessment in China // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 115. 109387. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109387
14. Long M., Becerra M., Thottappillil R. On the attachment of dart lightning leaders to wind turbines // Electric Power Systems Research. 2017. Vol. 151. P. 432–439.
15. Yu Wang, Yeqiang Deng, Yilu Liu, Lu Qu, Xishan Wen et al. Influence of blade rotation on the lightning stroke characteristic of a wind turbine // Wind Energy. 2019. Vol. 22. Iss. 8. P. 1071–1085.
16. Кузнецов Н. М., Коновалова О. Е. Альтернативная энергетика на арктических территориях Российской Федерации // Промышленная энергетика. 2019. № 10. С. 40–46.
17. Muratori M., Jadun P., Bush B., Bielen D., Vimmerstedt L. et al. Future integrated mobility-energy systems: A modeling perspective // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 119. 109541. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109541
18. D'Arco S., Suul J. A., Fosso O. B. A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids // Electric Power Systems Research. 2015. Vol. 122. P. 180–197.
19. Путткамер К., Форткаль П. Комплексное планирование производства – учет энерго- и ресурсоэффективности // Черные металлы. 2017. № 2. С. 56–60.
20. Шпиганович А. А., Федоров О. В., Пушница К. А., Чуркина Е. В. Особенности функционирования систем электроснабжения предприятий черной металлургии // Черные металлы. 2017. № 5. С. 56–61.
21. Адам Х. Через электричество к устойчивому развитию? // Черные металлы. 2019. № 2. С. 61–65. 

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp. 96–100
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.14

Kola power network development for the sake of the mining industry in the Murmansk Region

Information about authors

N. M. Kuznetsov¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, kuzn55@mail.ru

V. A. Minin¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences

V. N. Selivanov¹, Director, Candidate of Engineering Sciences

¹Center for Physicotechnical Problems of Power Generation Sector of the North, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

Efficiency advancement in the power generation sector in the Arctic area requires technical and economic analysis of the centralized and independent power supply performance based on the forecast of consumption of fuel and power resources. The backbone of the Murmansk Region economy is the primary industry, including its most power-hungry branches of ferrous metallurgy, nonferrous metallurgy and mining-and-chemical industry. Reliable power supply is critical for the efficient economic performance of the Murmansk Region. To this effect, it is required to adhere to energy-saving, to change to a new power network architecture with distributed power generation, digitalization and intellectualization of power supply, as well as to expand distributed power generation in the energy budget with active participation of consumers in the power demand management. Integration of distributed power generation from renewable energy sources toward sustainable advance and performance of the power network needs a sound concept of virtual power plants, aimed to incorporate generation sources, energy storages and energy consumers. Virtual power plants are to administer power system capacity distribution, voltage adjustment, and wattless power and frequency drift control in the power system upon variation in power consumption.

This article describes the Kola power system diagram, history of power consumption in the Murmansk Region and the change in the fuel-and-energy budget structure with development of the regional mining industry.

Keywords: mining sector, power system, hydropower engineering, wind power generation, tidal power, energy saving, power resources.

References

1. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/499091750> (accessed: 15.06.2020).
2. Leksin V. N., Porfirev B. N. Redevelopment of the Arctic area of Russia as an objective of systems research and special-purpose program management methodological issues. *Ekonomika regiona*. 2015. No. 4(44). pp. 9–20.
3. Melnikov N. N. Role of the Arctic Region in the innovation-driven economic development of Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 7. pp. 23–27. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.04

4. Lukichev S. V., Zhiro D. V., Churkin O. E. Mineral reserves and mineral resources of the Murmansk Region: Current conditions and prospects. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 6. pp. 19–24. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.01
5. Klyukin A. M., Kuznetsov N. M., Tribunalov S. N. Improving the efficiency of energy use in the Murmansk region. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016. No. 5-13(39). pp. 107–118.
6. Shutskiy V. I., Kuznetsov N. M., Tokareva E. A., Fishchuk S. A. Analysis and forecasting of power consumption in the Murmansk Region. *Promyshlennaya energetika*. 1998. No. 10. pp. 5–9.
7. Efimov B. V., Selivanov V. N. Survey of external impacts on electric grid of Kola power system. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2015. No. 2(28). pp. 34–40.
8. Morozov I. N., Kuznetsov N. M., Belova L. A., Borozdina E. D. Transient modes of 110 kv electrical substations using simulation modeling in a MATLAB environment. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2020. No. 1. pp. 113–122.
9. Minin V. A. Prospects for the implementation of renewable energy sources in fuel and energy balance of Murmansk region. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012. No. 5(12). pp. 106–112.
10. Minin V. A., Kononova O. E., Ivanova E. A. Prospects of using micro HPP in remote areas of the North. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2013. No. 3(14). pp. 62–68.
11. Minin V. A., Furtaev A. I. Wind potency in the western sector of the Russian Arctic and its possible uses. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 302. 012067. DOI: 10.1088/1755-1315/302/1/012067
12. Fischer A., Montuelle L., Mougeot M., Picard D. Statistical learning for wind power: A modeling and stability study towards forecasting. *Wind Energy*. 2017. Vol. 20, Iss. 12. pp. 2037–2047.
13. Qinkai Han, Sai Ma, Tianyang Wang, Fulei Chu. Kernel density estimation model for wind speed probability distribution with applicability to wind energy assessment in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 115. 109387. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109387
14. Long M., Becerra M., Thottappillil R. On the attachment of dart lightning leaders to wind turbines. *Electric Power Systems Research*. 2017. Vol. 151. pp. 432–439.
15. Yu Wang, Yeqiang Deng, Yilu Liu, Lu Qu, Xishan Wen et al. Influence of blade rotation on the lightning stroke characteristic of a wind turbine. *Wind Energy*. 2019. Vol. 22, Iss. 8. pp. 1071–1085.
16. Kuznetsov N. M., Kononova O. E. Alternative power engineering in Russia's Arctic. *Promyshlennaya energetika*. 2019. No. 10. pp. 40–46.
17. Muratori M., Jadun P., Bush B., Bielen D., Vimmerstedt L. et al. Future integrated mobility-energy systems: A modeling perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 119. 109541. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109541
18. D'Arco S., Suul J. A., Fosso O. B. A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids. *Electric Power Systems Research*. 2015. Vol. 122. pp. 180–197.
19. Puttkammer K., Vornkahl P. Integrated production planning – thinking energy and resource efficiency one step ahead. *Chemische Metallurgie*. 2017. No. 2. pp. 56–60.
20. Shpigonovich A. A., Fedorov O. V., Pushnitsa K. A., Churkina E. V. Operating features of electric power supply systems at the iron and steel works. *Chemische Metallurgie*. 2017. No. 5. pp. 56–61.
21. Adam H. Through electricity to sustainable development? *Chemische Metallurgie*. 2019. No. 2. pp. 61–65.