



## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Н.С. Волотковская<sup>1</sup>, А.С. Семёнов<sup>1</sup>, Ю.В. Бебихов<sup>1,2</sup>, В.А. Шевчук<sup>3</sup>, О.В. Федоров<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,  
Политехнический институт (филиал), г. Мирный, Россия

<sup>2</sup>Предприятие тепловодоснабжения АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Россия

<sup>3</sup>Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск, Россия

<sup>4</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород, Россия

volotkovska\_n@mail.ru

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Проанализировать сценарии развития энергетического комплекса одного из регионов Северо-Востока России на период до 2030 года с целевым видением до 2050 года. Для чего потребуется: провести анализ современного состояния энергетического комплекса; показать последние изменения в системе электроснабжения; предложить перспективные направления трансфера электроэнергии из региона и обратно. МЕТОДЫ. Для оценки современного состояния электроэнергетики, с точки зрения максимально эффективного использования природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора экономики, были применены методы сбора и обработки статистических данных. Для технической оценки состояния электроэнергетических объектов были применены аналитический и логико-вероятностный методы определения надежности. Для прогнозирования энергопотребления были применены методы математического моделирования с построением аппроксимирующих полиномов. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье произведена оценка стратегического и умеренно сценариев развития энергетики Республики Саха (Якутия) в современных условиях с учетом повышения энергоэффективности экономики региона. Оценке подлежали показатели потребления электроэнергии по всей республике, Западному энергорайону и децентрализованной зоне электроснабжения. Сделанные долгосрочные прогнозы не подтверждают развитие событий согласно более жесткому стратегическому сценарию. В то же время результаты по умеренному сценарию полностью коррелируются как с текущим состоянием энергетики, так и с перспективами её развития. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Анализ текущего состояния и оценка сценариев развития энергетического сектора экономики республики показали: повышение надежности систем электроснабжения при организации «колец» в Западном энергорайоне; увеличение полезного электропотребления к 2030 г.; прирост производства электроэнергии; изменение структуры производства электроэнергии.

**Ключевые слова:** энергетический комплекс; электроэнергетика; энергоэффективность; потребление электроэнергии; система электроснабжения; подстанция; сценарий развития.

**Для цитирования:** Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Шевчук В.А., Федоров О.В. Перспективы развития энергетического комплекса Северо-Востока России // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 58-69. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69.

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE ENERGY COMPLEX OF THE NORTH-EAST OF RUSSIA

NS. Volotkovskaya<sup>1</sup>, AS. Semenov<sup>1</sup>, YV. Bebikhov<sup>1,2</sup>, VA. Shevchuk<sup>3</sup>, OV. Fedorov<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Ammosov North-Eastern Federal University, Polytechnic Institute (branch), Mirny,  
Russia

<sup>2</sup>Heat and Water Supply Company (PJSC ALROSA), Mirny, Russia

<sup>3</sup>JSC Research and Production Center Polyus, Tomsk, Russia

<sup>4</sup>Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

volotkovska\_n@mail.ru

**Abstract:** *THE PURPOSE.* To analyze scenarios for the development of the energy complex of one of the regions of the North-East of Russia for the period up to 2030 with a target vision until 2050. This will require an analysis of the current state of the energy complex; show the latest changes in the power supply system; propose promising areas for the transfer of electricity. *METHODS.* To assess the current state of the electric power industry, from the point of view of the most efficient use of natural energy resources and the potential of the energy sector of the economy, methods of collecting and processing statistical data were applied. For the technical assessment of the state of electric power facilities, analytical and logical-probabilistic methods for determining reliability were applied. To predict energy consumption, mathematical modeling methods were used with the construction of approximating polynomials. *RESULTS.* The article evaluates the strategic and moderate scenarios for the development of the energy sector of the Republic of Sakha (Yakutia) in modern conditions, taking into account the increase in the energy efficiency of the region's economy. The indicators of electricity consumption throughout the republic, the Western Energy District and the decentralized power supply zone were subject to assessment. Long-term forecasts made do not confirm the development of events according to a more stringent strategic scenario. At the same time, the results for the moderate scenario are fully correlated with both the current state of the energy sector and the prospects for its development. *CONCLUSION.* Analysis of the current state and assessment of scenarios for the development of the energy sector of the republic's economy showed an increase in the reliability of power supply systems when organizing a "ring" in the Western Energy District; increase in useful electricity consumption by 2030; increase in electricity production; changes in the structure of electricity production.

**Keywords:** *energy complex; electric power industry; energy efficiency; electricity consumption; power supply system; substation; development scenario.*

**For citation:** Volotkovskaya NS, Semenov AS, Bebikhov YV, Shevchuk VA, Fedorov OV. Prospects for the development of the energy complex of the North-East of Russia. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):58-69. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69.

### **Введение и литературный обзор**

Целью энергетической политики России является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и содействия укреплению ее внешнеэкономических позиций [1-3]. Реализация энергетической политики на субфедеральном уровне влияет на объективные процессы социально-экономического развития республики, в том числе с учетом резких изменений внешних и внутренних факторов, определяющих основные параметры функционирования топливно-энергетического комплекса страны [4, 5].

При этом основные направления энергетической политики используются при разработке и корректировке стратегии социально-экономического развития, программных документов по промышленному освоению территории республики, при подготовке и корректировке параметров инвестиционных программ и крупных проектов компаний энергетического сектора [6, 7].

Реализация проектов, связанных с освоением природных ресурсов, с развитием обрабатывающих производств, проектов в сфере услуг и сельском хозяйстве требует опережающего планирования развития энергетической инфраструктуры, топливно-энергетического комплекса [8, 9].

### **Цель, задачи и объект исследования**

Целью работы является проведение анализа и оценка выполнения мероприятий утвержденной «Энергетической стратегии Республики Саха (Якутия) на период до 2030 г.», определение стратегических направлений дальнейшего развития энергетики Республики Саха (Якутия) в современных условиях с учетом повышения энергоэффективности экономики региона и роста качества жизни населения.

Задачи: анализ современного состояния энергетического комплекса республики;

оценка ресурсной базы для электроэнергетики; анализ эффективности разработанных мероприятий (сценариев) развития энергетического комплекса республики на период до 2030 г. с целевым видением до 2050 г.

Объект исследования: электроэнергетические показатели в энергетике Республики Саха (Якутия), в том числе Западного энергетического района (ЗЭР) и с учетом децентрализованного электроснабжения.

### Материалы и методы

Для оценки современного состояния электроэнергетики, с точки зрения максимально эффективного использования природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора экономики, были применены методы сбора и обработки статистических данных. Были использованы формы Росстата: Электробаланс за 2010-2018 гг., Топливо-энергетический баланс за 2010-2018 гг., а также форма 2п Министерства экономики РС (Я).

Для технической оценки состояния электроэнергетических объектов были применены аналитический и логико-вероятностный методы определения надежности. Авторами в работе [10] были разработаны математические модели на основе законов распределения наработки до отказа. Выбор закона распределения, в значительной мере, процедура неопределенная и во многом субъективная, при этом многое зависит от априорных знаний об объекте и его свойствах, условиях работы. Для оценки надежности энергетических объектов применили экспоненциальный закон распределения.

Считается, что случайная величина наработки объекта до отказа подчинена экспоненциальному распределению, если плотность распределения отказов описывается выражением:

$$f(t) = \alpha \cdot \exp(-\alpha t),$$

где  $\alpha$  – параметр распределения, который по результатам испытаний принимается равным  $\alpha \approx 1/T_0$ ;  $T_0$  – оценка средней наработки до отказа.

Средняя наработка до отказа (т.е. математическое ожидание) и её дисперсия определяются по формулам:

$$T_0 = 1/\lambda, \\ D = 1/\lambda^2,$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов.

Тогда графики изменения показателей безотказности при экспоненциальном распределении будут иметь следующий вид (рис. 1).

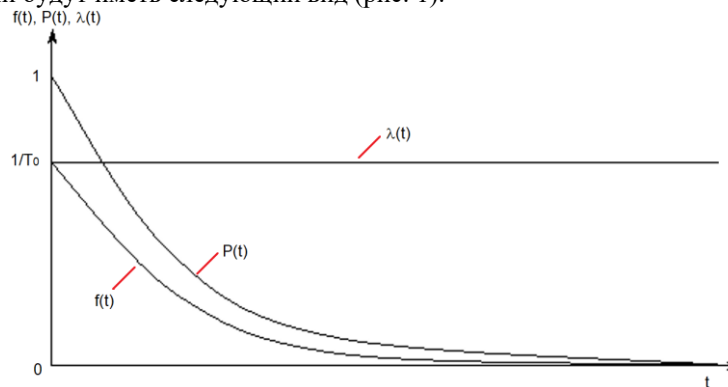


Рис.1 Графики показателей безотказности при экспоненциальном распределении:  $P(t)$  – вероятность безотказной работы,  $f(t)$  – плотность распределения отказов,  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов.

Fig. 1 Graphs of failure rates with exponential distribution:  $P(t)$  – the probability of failure,  $f(t)$  – the density of the distribution of failures,  $\lambda(t)$  – the failure rate.

Особенность экспоненциального распределения заключается в том, что интенсивность отказов является постоянной величиной, не зависящей от времени, и обратно пропорциональной оценке средней наработки. Этот фактор обуславливает широкое применение экспоненциального распределения для оценки надежности энергетических объектов.

Для прогнозирования энергопотребления были применены методы математического моделирования с построением аппроксимирующих полиномов. Исходными данными для построения являлись статистические данные, оцененные в первой части работы и проанализированные ранее авторами в [11]. В программе MatLab предусмотрена функция

$\text{polyfit}(x, y, n)$ , реализующая метод наименьших квадратов. Предварительно нужно задать вектора значений функции  $y$  и аргумента  $x$ . Обоснованно выбрать степень полинома можно путём вычисления табличных разностей с помощью функции  $\text{dyff}(y, n)$ , предпочтение отдаётся полиному с меньшими табличными разностями. Выбираем полином порядка  $n$ , так чтобы порядок полинома был на единицу меньше размерности векторов  $x$  и  $y$ , тогда график полинома будет проходить через точки этих векторов. Результатом расчёта является вектор коэффициентов полинома в порядке убывания степени  $x$ . Аппроксимирующий полином запишется в виде:

$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_d x^d$$

где  $a$  – расчетные коэффициенты,  $d$  – порядок (степень) полинома.

Проверить достоверность результатов аппроксимации можно с помощью оператора  $\text{polyval}(a, x)$ . Полное совпадение с исходными данными будет свидетельствовать о том, что данный полином можно рассматривать как математическую модель. В случае наличия неточностей, сглаживание исходных данных можно осуществить с помощью функции  $\text{lsqcurvefit}(f, a_0, x, y)$ , где  $a_0$  – стартовое значение неизвестных параметров функции  $f$ .

### Результаты и обсуждения

Республика Саха (Якутия) как субъект Российской Федерации входит в Дальневосточный федеральный округ и занимает почти всю северо-восточную часть азиатского материка, выходя на побережье двух морей Северного Ледовитого океана. Свыше 40% территории республики находится за Полярным кругом. Республика на востоке граничит с Чукотским автономным округом, Магаданской областью и Хабаровским краем, на юге – с Забайкальским краем, Амурской и Иркутской областями, на западе – с Красноярским краем, с севера омывается морями Лаптевых и Восточно-Сибирским. Общая протяженность морской береговой линии превышает 4,5 тыс. км.

### Анализ современного состояния электроэнергетики

Энергосистема Республики Саха (Якутия) состоит из трех энергорайонов – Западного, Центрального и Южно-Якутского [12]. Южно-Якутский и Западный энергорайоны имеют электрическую связь по двум одноцепным ВЛ 220 кВ «Олекминск – НПС-15 – Нижний Куранах» с отпайками на нефтеперекачивающие станции НПС-14 и НПС-16. Южно-Якутский и Центральный энергорайоны имеют электрическую связь по ВЛ 220 кВ «Нижний Куранах – Майя». Южно-Якутский энергорайон обеспечивает энергией Южно-Якутский территориально-промышленный комплекс, Нерюнгринский и Алданский промышленные и сельскохозяйственные узлы, связан двумя линиями электропередачи 220 кВ с Объединенной энергосистемой Востока. Центральный энергорайон обеспечивает энергией центральный промышленный узел и группу центральных районов. Западный энергорайон (ЗЭР) объединяет Айхало-Удачинский, Мирнинский, Ленский промышленные узлы и группу вилюйских сельскохозяйственных районов, а также имеет связь с Олекминским районом (рис. 2).

2 января 2019 г. Западный и Центральный энергорайоны вошли в состав Единой энергосистемы России с включением на параллельную работу с Объединенной энергосистемой Востока. Республика Саха (Якутия) имеет внешние электрические связи с Амурской, Иркутской и Магаданской энергосистемами, а также с Чаун-Билибинским энергоузлом Чукотского автономного округа.

Зона децентрализованного электроснабжения включает в себя обширную территорию республики с большим количеством автономных электростанций, которые снабжают отдельные поселки и горнодобывающие предприятия [13]. Зона действия автономной энергетики охватывает площадь 2,2 млн. км<sup>2</sup> (64%) с 15% проживающего в республике населения. Основная часть мощности автономных электростанций (около 200 МВт) расположена на территории так называемого Северного энергорайона и в объеме электропотребления республики занимает примерно 29% [14].

В условиях, сложившихся в Западном энергорайоне, учитывая большие мощности выработки электроэнергии и очень большие расстояния передачи электрической энергии от источников к потребителям, а также сложные климатические условия, помимо сетей напряжением 110 кВ запущены в эксплуатацию (с 2019 г.) и новые ЛЭП 220 кВ [15].

Если ранее ЛЭП 110 и 220 кВ выполнялись в одноцепном, двухцепном и трехцепном (от каскада Вилюйских ГЭС на п. Айхал) исполнении, то вновь запущенная в работу электрическая сеть 220 кВ выполнена по схеме кольца (рис. 2) и охватывает площадь более 50 000 км<sup>2</sup>, при этом значительно повышая одно из основных требований, предъявляемых к электроснабжению объектов потребителей, а именно надежность/бесперебойность [16]. На однолинейной схеме, представленной на рис. 3, наглядно видно исполнение электрических соединений узловых подстанций.

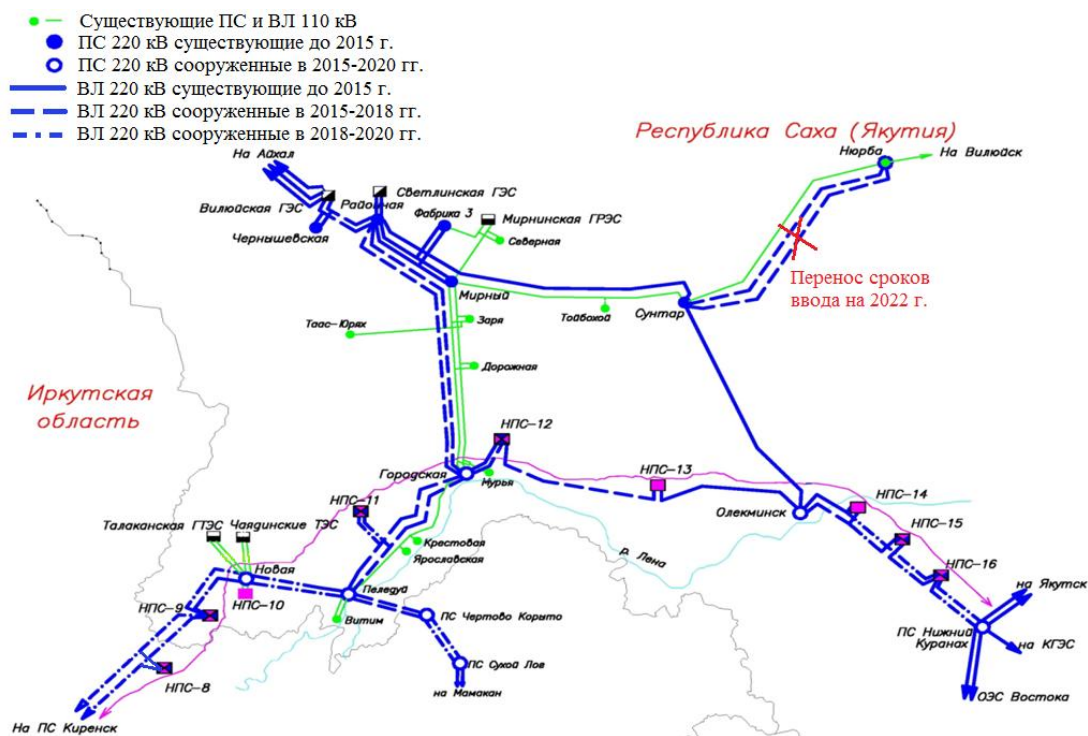


Рис.2 Карта энергосистемы Западного энергорайона

Fig. 2 Map of the power system of the Western Energy District

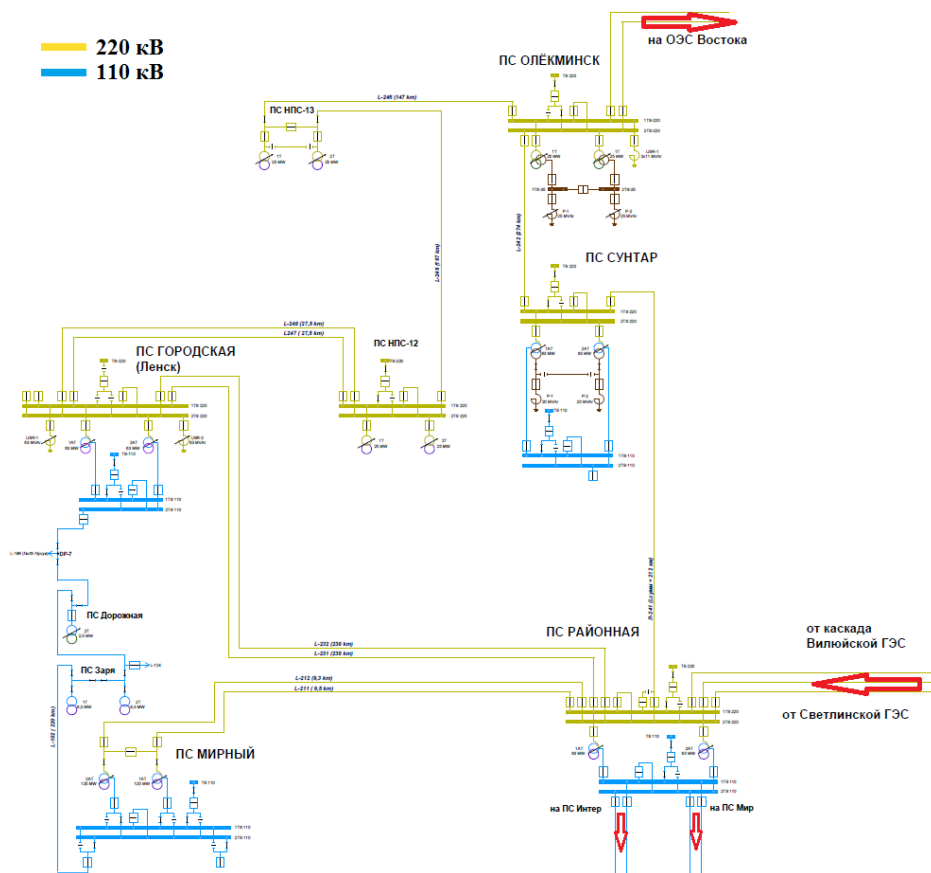


Рис.3 Однолинейная кольцевая схема электроснабжения Западного энергорайона республики

Fig. 3 Single-line circular scheme of power supply in the Western energy district of the Republic

Преимуществом кольцевой схемы помимо надежности электроснабжения является

независимость потоков в секциях ПС от потоков в самой сети высокого напряжения, что особенно важно в послеаварийных режимах и дает возможность применения более простых устройств релейной защиты и автоматики, и как правило, более низкие уровни токов короткого замыкания. Такая система является достаточно гибкой, приспособляемой к разным режимам распределения мощности, возникающим в результате изменений нагрузок в узлах потребителей, а также при плановых или аварийных отключениях, производимых в сети. Конфигурация и параметры сети обеспечивают возможность ее дальнейшего развития без коренных изменений, а именно включение вновь вводимых проходных подстанций в расщелку существующей кольцевой ЛЭП, например, нефтеперекачивающие и компрессорные станции (НПС-11,14,16,17, КС-1,2). Все они являются подстанциями глубокого ввода 220/6-10 кВ при большом сосредоточении нагрузок.

В настоящее время кольцевая сеть выполнена в железобетонных опорах ВЛ-220 кВ и присоединяется к каскаду Вилюйских ГЭС 1 и 2, а также к Светлинской ГЭС (общая установленная мощность 957,5 МВт) через узловую ПС «Районная» и является одноконтурной кольцевой схемой с несколькими узловыми точками (точка сети с присоединением более двух линий). Еще три узловые подстанции кольца находятся в п. Сунтар (ПС «Сунтар»), п. Олекминск (ПС «Олекминск») и г. Ленск (ПС «Городская»). В эксплуатации находятся и ранее существующие высоковольтные линии в деревянных опорах напряжением 110 кВ от ПС «Мирный» до ПС «Городская», которая идет далее до ПС «Пеледуй», и от ПС «Мирный» до ПС «Сунтар», которая идет далее в поселки Вилюйской группы улусов.

От ПС «Сунтар» ЛЭП-110 кВ идет далее на ПС «Нюрба», ПС «Верхневилуйск» и ПС «Вилуйск», тем самым давая возможность в перспективе соединения Западного энергорайона с системой Центрального энергорайона республики. ЛЭП-220 кВ и существующая ранее ЛЭП-110 кВ от ПС «Городская» до ПС «Пеледуй» осуществляет передачу электрической энергии золотодобывающим предприятиям Бодайбинского района Иркутской области, а также объектам нефтепроводов ВСТО и Сила Сибири. Также на территории ЗЭР автономно функционируют электростанции ОАО «Сургутнефтегаз» суммарной установленной мощностью 194,4 МВт.

В конце 2019 г. завершено строительство ВЛ 220 кВ «Пеледуй – Сухой Лог» с ПС 220 кВ «Сухой Лог» и далее на ПС «Мамакан» 1 и 2, что позволило завершить формирование кольца 220 кВ «Пеледуй – Сухой Лог – Таксимо – Мамакан – Усть-Кут – НПС-9 – Пеледуй».

Однако, есть и отрицательные результаты. Анализ показателей безотказности при помощи экспоненциального закона распределения наработки до отказа по статистическим данным электрических сетей ПАО «Якутскэнерго» показал, что удельное число отказов воздушных линий электропередачи на 1 км в год составляет: на деревянных опорах – 3%; на железобетонных опорах – 13%; на опорах из металлических труб – 10%. Исходя из максимального срока службы опор 25-30 лет, необходимо чтобы в состоянии степени изношенности 80% находилось единовременно не более 7-10% деревянных опор магистральных электрических сетей 35-220 кВ и не более 10-12% опор распределительных электрических сетей 6-10/0,4 кВ. Однако, анализ состояния деревянных опор показывает, что такие линии 220 кВ, как Л-203, 204, 206 (идущие на Айхал на рис. 2), и линии 110 кВ – Л-108, 109, 117, 119 (идущие в сторону Вилюйска на рис. 2) эксплуатируются в «ухудшенном» состоянии, и износ воздушных линий, так же, как и степень изношенности оборудования подстанций, с каждым годом увеличивается.

#### **Анализ предложенных сценариев развития энергетического комплекса**

За последние 10 лет энергопотребление в Республике Саха (Якутия) выросло на 56%, а ежегодный потенциал энергоснабжения увеличился на 12% в связи с увеличением электропотребления, потерь электроэнергии и развитием силовой преобразовательной техники. По прогнозам производство электроэнергии за 2020 год составит 11150 млн. кВт·ч (в том числе на гидроэлектростанциях будет произведено 3500 млн. кВт·ч), а потребление выйдет на отметку 10377 млн. кВт·ч. Тогда как в 2015 году было произведено 9951 млн. кВт·ч, а потреблено 9015 млн. кВт·ч. В связи с этим возрастет и спрос на энергоресурсы. В приоритете останутся уголь – 37% и газ – 26%, а электроэнергия составит только 15% [17, 18].

Разработаны два сценария дальнейшего развития отраслей топливно-энергетического комплекса республики: стратегический (более жесткий) и умеренный. Согласно стратегическому сценарию развития экономики республики производство электроэнергии к 2030 г. увеличится по сравнению к уровню 2018 г. в 1,76 раза и составит 17,1 млрд. кВт·ч. Полезное потребление за период с 2018 г. до 2030 г. увеличится до 12,9 млрд. кВт·ч, т.е. в

1,75 раза.

Объемы электропотребления в производстве будут складываться из экономии электроэнергии, роста электропотребления производства и роста потерь электроэнергии. При этом увеличение расходов электроэнергии на собственные нужды не предвидится. Более высокий по уровню электропотребления стратегический и умеренный сценарии электропотребления по всей территории республики показаны на рис. 4.

Из графиков видно, что в Западном энергетическом районе прогнозируемое электропотребление по стратегическому сценарию будет расти не так интенсивно, как по всей республике в целом, а по умеренному сценарию к 2030 г. наблюдается даже уменьшение уровня. При этом ЗЭР потребляет в данный момент 49,4% от всего объема потребления по Якутии. Это связано с тем, что к 2030 г. завершится подземная разработка кимберлитовой трубки «Интернациональная» и оставшиеся подкарьерные запасы решено отрабатывать открытым способом [19]. Этот факт, несомненно, уменьшит электропотребление, так как электрооборудование подземного комплекса рудника «Интернациональный» имеет суммарную мощность более 30 МВт [20].

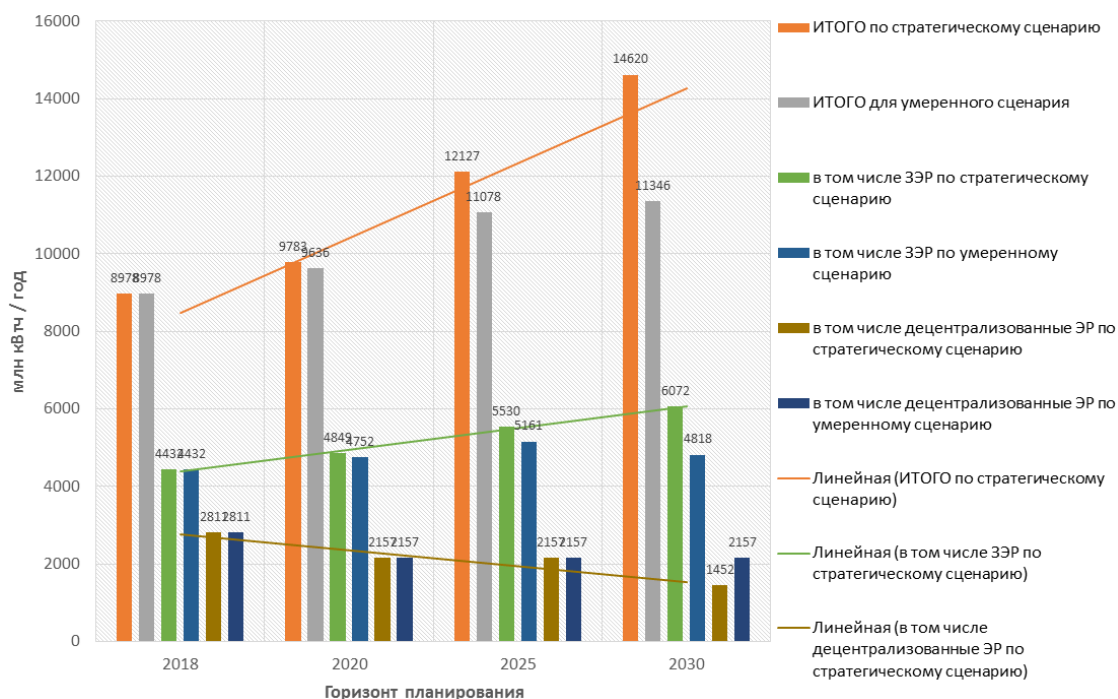


Рис.4 Уровни потребления электроэнергии в республике при двух возможных сценариях

Fig. 4 Levels of electricity consumption in the republic under two possible scenarios

Карантинные меры, вызванные вирусом Covid-19, внесут определенные коррективы в цифры прогнозов развития электроэнергетики Якутии и ЗЭР в том числе. Скорее всего прогноз на 2020 г. не подтвердится даже по умеренному варианту, но к 2025 г. ситуация должна выровняться [21].

Авторами был проведен дополнительный анализ показателей энергопотребления республики по двум сценариям на более долгосрочную перспективу и построены полиномиальные функции. Был применен полином 2-го порядка, так как на линейных графиках (рис. 4) имеется только один экстремум, в связи с чем полиномиальная аппроксимация не требуется. Воспользуемся методом наименьших квадратов, в основе которого лежит минимизация суммы квадратов отклонений функций от подлежащих нахождению переменных. Полученные характеристики и уравнения представлены на рис. 5.



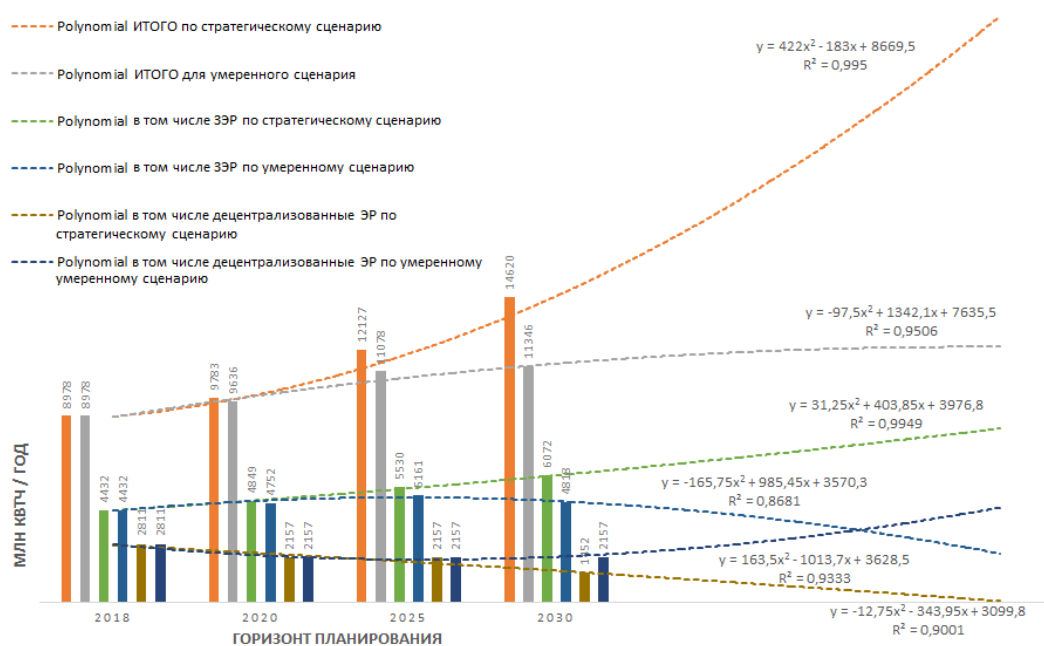


Рис.5 Прогнозируемые уровни потребления электроэнергии в республике, полученные при помощи полиномиального анализа

Fig. 5 Projected levels of electricity consumption in the republic, obtained using a polynomial analysis

Проанализировав полученные результаты, авторами были сделаны следующие выводы: наибольшую достоверность с показателем  $R^2=0,995$  показывает полиномиальная характеристика стратегического сценария электропотребления в республике, а наименьшую – умеренный сценарий электропотребления в Западном энергорайоне с показателем  $R^2=0,868$ . Из этого делаем вывод, что стратегический сценарий является слишком жестким, так как даже при открытии новых предприятий добычи нефти и газа, электропотребление в республики вряд ли к 2035 г. превысит 20 млрд. кВт·ч. Это связано с тем, что в современной структуре электропотребления республики добыча полезных ископаемых занимает лишь 32,2%. В то же время умеренный сценарий более точно предсказывает уровень электропотребления как по всей республике, так и в Западном энергорайоне, где электропотребление продолжит снижаться в связи с постепенным закрытием алмазодобывающих предприятий [22]. Остаются надежды на возобновление работы (приблизительно к 2040 г.) алмазодобывающего рудника «Мир», который был закрыт из-за аварии летом 2017 г. Что же касается децентрализованных энергорайонов, то прогнозы по двукратному снижению электропотребления согласно стратегическому сценарию кажутся нереальными в связи с началом работы в 2018 г. ГДК «Верхне-Мунское» и активными работами ПАО «Полус» и АО «Алмазы Анабара» по добыче золота и алмазов соответственно. При долгосрочном прогнозе умеренного сценария на полиномиальной характеристике электропотребления децентрализованных энергорайонов наблюдается обратное повышение до уровней 2018 г., что можно обосновать планами использования уникальных плавучих атомных теплоэлектростанций для электроснабжения Северных и Арктических территорий [23, 24].

### Выводы

Проанализировав текущее состояние электроэнергетического комплекса, и оценив сценарии развития энергетического сектора экономики республики, авторы сделали следующие выводы:

1. Развитие системы электроснабжения Западного энергорайона по принципу кольца с подключением к сетям Объединенной энергосистемы Востока дает широкие возможности по передаче избытка электроэнергии в другие районы страны, либо при необходимости получение от других систем недостающих мощностей.

2. Полезное электропотребление значительно увеличивается в период 2025-2030 гг., среднегодовой темп прироста составит 4,8%, тогда как темп производства электроэнергии в этот период составит 1,1%. В связи с чем, в этот период будет происходить снижение отпуска электроэнергии в ОЭС Востока.

3. Среднегодовой темп прироста производства электроэнергии в целом за период с 2018 г. до 2032 г. составит 1,6%, а полезного потребления – 2,4%. В связи с этим возможно увеличение поставок в республику электроэнергии как из ОЭС Востока, так и ОЭС Сибири.



4. Согласно умеренному сценарию выработка электроэнергии будет расти существенно более низкими темпами в среднем в год 0,4% и достигнет величины 11,6 млрд. кВт·ч.

5. Структура производства электроэнергии изменится: доля ГЭС уменьшится, а доля ТЭС увеличится. Выработка электроэнергии возобновляемыми источниками будет, как и была невелика до 2-3 млн. кВт·ч.

6. Планируется использование плавучих атомных электростанций малой мощности, что позволит покрыть потребности новых проектов в Арктической зоне РФ.

### Литература

1. Proskuryakova L., Starodubtseva A., Bianco V. Modelling a household tariff for reducing sectoral cross-subsidies in the Russian power market // *Energy*. 2020. V. 213. No. 118725.

2. Земцов С.П., Кидяева В.М., Баринова В.А., и др. Экологическая эффективность и устойчивое развитие регионов России за двадцатилетие сырьевого роста // *Экономическая политика*. 2020. Т. 15. № 2. С. 18-47.

3. Proskuryakova L.N., Ermolenko G.V. The future of Russia's renewable energy sector: Trends, scenarios and policies // *Renewable Energy*. 2019. V. 143. P. 1670–1686.

4. Igaliyeva L., Niyazbekova S., Serikova M., et al. Towards environmental security via energy efficiency: A case study // *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2020. V. 7. Is. 4. P. 3488–3499.

5. Gardiner R., Hajek P. Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus. A case of EU regions // *Waste Management*. 2020. V. 114. P. 124–135.

6. Грудистова Е.Г. Занятость в условиях цифровизации общества: региональный аспект // *Проблемы социально-экономического развития Сибири*. 2020. № 3 (41). С. 15–22.

7. Gouveia J.P., Palma P. Harvesting big data from residential building energy performance certificates: Retrofitting and climate change mitigation insights at a regional scale // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14. Is. 9. No. 095007.

8. Миндели Л.Э., Акоев М.А., Золотова А.В., и др. Библиометрическая оценка тенденций развития отечественных исследований и модели научного сотрудничества в фундаментальной науке в области энергетики // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 7. С. 664–677.

9. Moshkovich A., Rapoport L.S. Effect of stacking-fault energy on the deformed structures and work hardening of Ag and Ni after scratching during early loading stage // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. V. 29. Is. 11. P. 7231–7238.

10. Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Федоров О.В. Анализ структуры и технического состояния западных электрических сетей Республики Саха (Якутия) // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 46–55.

11. Бебихов Ю.В., Грачева Е.И., Павлова С.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В. Эффективность и потенциал сбережения топлива и энергии в северо-восточном регионе России (на примере Республики Саха (Якутия)) // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2020. Т. 12. № 3 (47). С. 14–27.

12. Volotkovskaya Y.A., Volotkovskaya N.S., Semenov A.S., et al. Analysis of the global energy resource market // *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 178. No. 01058.

13. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22. № 2. С. 65–74.

14. Elyakova I.D., Elyakov A.L., Karataeva T.A., et al. Conditions for effective long-term energy supply to the arctic areas of the Republic of Sakha (Yakutia) // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2018. V. 8. Is. 6. P. 361–370.

15. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И., др. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22. № 1. С. 38–48.

16. Gerasimov D.O., Serdyukova E.V., Suslov K.V., et al. Energy hub component models for multi-energy system // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1582. Is. 1. No. 012033.

17. Zhang L., Song G., Ma X., et al. Decarbonising residential building energy towards achieving the intended nationally determined contribution at subnational level under uncertainties // *Journal of Cleaner Production*. 2020. V. 272. No. 122760.

18. Nevzorova T. Biogas production in the Russian federation: Current status, potential, and barriers // *Energies*. 2020. V. 13. Is. 14. No. 3620.
19. Шевырëв Ю.В., Шевырева Н.Ю. Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // *Горный журнал*. 2019. № 1. С. 66–69.
20. Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Расчет удельных норм электропотребления для выемочных участков угольных шахт // *Горный журнал*. 2020. № 4. С. 66–68.
21. Volotkovskaya N.S., Semenov A.S., Fedorov O.V. Feasibility of Energy Sector Development and Optimization Program of the Republic of Sakha (Yakutia) // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 753. Is. 8. No. 082033.
22. Волотковская Н.С., Семенов А.С., Федоров О.В. Энергоэффективность и энергосбережение в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. 2019. № 3 (78). С. 52–62.
23. Tarasova O.V., Sokolova A.A. Spatial organization of the Chukotka's economy // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 302. Is. 1. No. 012113.
24. Handrlica J. Underground repositories, reprocessing facilities and floating nuclear power plants: Liability issues revisited // *Journal of Energy and Natural Resources Law*. 2019. V. 37. Is. 3. P. 263–288.

#### Авторы публикации

**Волотковская Наталья Сергеевна** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедры Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Политехнический институт (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном. Email: volotkovska\_n@mail.ru. Тел: 8(984)1168650.

**Семёнов Александр Сергеевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Политехнический институт (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном. Email: sash-alex@yandex.ru. Тел: 8(914)2950425.

**Бибихов Юрий Владимирович** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Политехнический институт (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном. Email: bebikhov.yura@mail.ru. Тел: 8(914)2523159.

**Шевчук Владислав Алексеевич** – канд. техн. наук, инженер-конструктор Научно-производственного центра «Полус». Email: shevchukvlal@yandex.ru..

**Федоров Олег Васильевич** – д-р. техн. наук, проф., профессор кафедры Управления инновационной деятельностью Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева. Email: fov52@mail.ru.

#### References

1. Proskuryakova L, Starodubtseva A, Bianco V. Modeling a household tariff for reducing sectoral cross-subsidies in the Russian power market. *Energy*. 2020;213:118725.
2. Zemtsov S.P., Kidyaeva V.M., Barinova V.A., Lanshina T.A. Environmental efficiency and sustainable development of the regions of Russia for twenty years of raw materials growth. *Economic policy*. 2020;15(2):18-47.
3. Proskuryakova LN, Ermolenko GV. The future of Russia's renewable energy sector: Trends, scenarios and policies. *Renewable Energy*. 2019;143:1670-1686.
4. Igaliyeva L, Niyazbekova S, Serikova M, et al. Towards environmental security via energy efficiency: A case study. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2020;7(4):3488-3499.
5. Gardiner R, Hajek P. Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus - A case of EU regions. *Waste Management*. 2020;114:124-135.
6. Grudistova EG. Employment in the context of digitalization of society: a regional aspect. *Problems of socio-economic development of Siberia*. 2020;3 (41):15-22.

7. Gouveia JP, Palma P. Harvesting big data from residential building energy performance certificates: Retrofitting and climate change mitigation insights at a regional scale. *Environmental Research Letters*. 2019;14(9):095007.
8. Mindeli LE, Akoev MA, Zolotova AV, et al. Bibliometric assessment of trends in the development of domestic research and models of scientific cooperation in fundamental science in the field of energy. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2020;90(7):664–677.
9. Moshkovich A, Rapoport LS. Effect of stacking-fault energy on the deformed structures and work hardening of Ag and Ni after scratching during early loading stage. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020;29(11):7231-7238.
10. Volotkovskaya NS, Semyonov AS, Fedorov OV. Analysis of the structure and technical condition of the western electrical networks of the Republic of Sakha (Yakutia). *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2018;20(11)-12:46–55.
11. Bebikhov YuV, Gracheva EI, Pavlova SN, et al. Efficiency and potential for saving fuel and energy in the north-eastern region of Russia (on the example of the Republic of Sakha (Yakutia)). *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2020;12:3 (47):14–27.
12. Volotkovskaya YA, Volotkovskaya NS, Semenov AS, et al. Analysis of the global energy resource market. *E3S Web of Conferences*. 2020;178:01058.
13. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and assessment of energy savings in intra-plant power supply systems. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2020;22(2):65–74.
14. Elyakova ID, Elyakov AL, Karataeva TA, et al. Conditions for effective long-term energy supply to the arctic areas of the Republic of Sakha (Yakutia). *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2018;8(6):361-370.
15. Safin AR, Ivshin IV, Gracheva EI, et al. Development of a mathematical model of an autonomous power supply with a free-piston engine based on a synchronous reciprocating electric machine with permanent magnets. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2020;22(1):38–48.
16. Gerasimov DO, Serdyukova EV, Suslov KV, et al. Energy hub component models for multi-energy system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1582(1):012033.
17. Zhang L, Song G, Ma X, et al. Decarbonising residential building energy towards achieving the intended nationally determined contribution at subnational level under uncertainties. *Journal of Cleaner Production*. 2020;272:122760.
18. Nevzorova T. Biogas production in the Russian federation: Current status, potential, and barriers. *Energies*. 2020;13(14):3620.
19. Shevyrev YuV, Shevyreva NYu. Improvement of the voltage shape in power supply systems of enterprises of the mineral resource complex with an active rectifier. *Gornyi Zhurnal*. 2019;1:66–69.
20. Kubrin SS, Reshetnyak SN. Calculation of specific norms of power consumption for mining areas of coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020;4:66–68.
21. Volotkovskaya NS, Semenov AS, Fedorov OV. *Feasibility of Energy Sector Development and Optimization Program of the Republic of Sakha (Yakutia)*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;753(8):082033.
22. Volotkovskaya NS, Semenov AS, Fedorov OV. Energy efficiency and energy saving in power supply systems of mining enterprises. *Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoy*. 2019;3 (78):52–62.
23. Tarasova OV, Sokolova AA. *Spatial organization of the Chukotka's economy*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;302(1):012113.
24. Handrlica J. Underground repositories, reprocessing facilities and floating nuclear power plants: Liability issues revisited. *Journal of Energy and Natural Resources Law*. 2019;37(3):263–288.

#### Authors of the publication

**Natalia S. Volotkovskaya** – NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Mirny, Sakha, Russia. Email: volotkovska\_n@mail.ru.

**Alexander S. Semenov** – NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Mirny, Sakha, Russia. Email: sash-alex@yandex.ru.

**Yuriy V. Bebikhov** – NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Mirny, Sakha, Russia. Email: bebikhov.yura@mail.ru.

**Vladislav A. Shevchuk** – JSC Research and Production Center Polyus, Tomsk, Russia. Email: shevchukvlal@yandex.ru.

**Oleg V. Fedorov** – NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. Email: fov52@mail.ru.

***Получено***

***Отредактировано***

***Принято***