



АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗАПАДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Н.С. Волотковская¹, А.С. Семёнов¹, О.В. Федоров²

¹СВФУ им. М.К. Аммосова, Политехнический институт (филиал) в г. Мирном,
г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

²НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9940-3915>, sash-alex@yandex.ru

Резюме: В работе произведен анализ технического состояния сетевого оборудования Западных электрических сетей ПАО «Якутскэнерго» за последние 10 лет. Показано географическое расположение сетей, обуславливающее масштабность исследования. Представлены технические показатели в интервале за 10 лет, свидетельствующие об увеличении объемов основных средств предприятия. Получены математические модели динамики износа электропередающего оборудования западных электрических сетей. Доказано, что техническое состояние оборудования будет в дальнейшем ухудшаться при отсутствии соответствующего финансирования.

Ключевые слова: Республика Саха (Якутия), западные электрические сети, линия электропередачи, подстанция, износ оборудования, надежность, математическая модель, техническое состояние.

Благодарности: Работа выполнена в рамках конкурса проектов 2018 года фундаментальных научных исследований, проводимого РФФИ совместно с субъектами Российской Федерации, проект № 18-48-140016.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-46-55.

Для цитирования: 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. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-46-55.

ANALYSIS OF STRUCTURE AND TECHNICAL CONDITION OF WESTERN ELECTRIC NETWORKS OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

N.S. Volotkovskaya¹, A.S. Semenov¹, O.V. Fedorov²

¹ NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

² NNTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9940-3915>, sash-alex@yandex.ru

Abstract: The paper analyzes the technical condition of the network equipment of Western electric networks of PJSC «Yakutskenergo» for the last 10 years. The geographical location of the networks of the electric networks is shown, which determines the scale of the study.

Technical indicators in the interval of 10 years are presented, which testify to an increase in the volume of fixed assets of the enterprise. Mathematical models of the wear dynamics of the transmission equipment of the Western electric networks have been obtained. It is proved that the technical condition of the equipment will deteriorate further in the absence of appropriate financing.

Keywords: Republic of Sakha (Yakutia), Western Electric Networks, power line, substation, equipment wear, reliability, mathematical model, technical condition.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the competition for projects of 2018 of fundamental scientific research conducted by RFBR jointly with the subjects of the Russian Federation, project No. 18-48-140016.

For citation: N.S. Volotkovskaya, A.S. Semenov, O.V. Fedorov. Analysis of structure and technical condition of western electric networks of the republic of Sakha (Yakutia). Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 46-55. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-46-55.

Введение

Повышение надежности работы электроэнергетических систем является одной из главных задач современной электроэнергетики. Решение этой задачи зависит от правильного подхода к организации своевременного оперативного обслуживания электрооборудования, от совершенства методов обоснованного принятия решений по техническому обслуживанию всей электроэнергетической системы [1]. Для этого необходимо всестороннее исследование нормальных и аварийных режимов работы электрических сетей и принятие мер по обеспечению их бесперебойного и надежного функционирования [2].

Исследованием оптимизации технического обслуживания, а также вопросов ремонта и диагностики электрических сетей в условиях севера занимались такие ученые, как Ю.З. Ковалева, Б.Г. Меньшова, М.С. Ершова, В.В. Сушкова, В.П. Фролова и другие представители научных школ [3].

Широкое внедрение электрической энергии в технологические процессы обуславливает все большую зависимость производства от надежности электроснабжения [4, 5]. Перерывы в подаче электричества из-за аварийных и внеплановых отключений, особенно в зимнее время или в условиях вечной мерзлоты, приводят к нарушению технологического процесса, выходу из строя оборудования, потерям продукции и денежных средств, а также к несчастным случаям на производстве [6].

В связи с этим все большую актуальность приобретают работы, направленные на исследование структуры и технического состояния передающего оборудования электрических сетей [7].

Основу электроэнергетики Республики Саха (Якутия) в настоящее время составляют электростанции и предприятия электрических сетей ПАО «Якутскэнерго» с установленной мощностью в 2143 МВт, обеспечивающие 96–97% общей выработки электроэнергии и свыше 30% тепловой энергии в Республике. В структуре установленной мощности электростанций ГЭС занимают 37,5%. Централизованным электроснабжением в настоящее время охвачено около 36% территории, или 18 из 35 административно-территориальных делений, где проживает более 85% населения Республики. На базе этих энергетических мощностей сформированы четыре крупных изолированных энергорайона: Центральный, Западный, Южный и Северный. Площадь обслуживания электрических сетей ПАО «Якутскэнерго» составляет 3,2 млн. кв. км.

В настоящее время основным источником электрической энергии и мощности для

Западного энергорайона являются ГЭС, расположенные на р. Вилюй: Вилюйская ГЭС (1 и 2 каскад) с установленной мощностью 680 МВт; Светлинская ГЭС с установленной мощностью 180 МВт. Кроме того, в отдельных населенных пунктах размещено еще несколько десятков мелких дизельных электростанций разной ведомственной принадлежности с распределением электроэнергии на напряжение 0,4–35 кВ, работающих изолированно.

Описание объекта исследования

Западные электрические сети (ЗЭС) обеспечивают электроснабжение потребителей западного энергорайона Республики Саха (Якутия), в том числе Мирнинского, Ленского и Вилюйской группы районов, в которую входят Сунтарский, Нюрбинский, Верхневилуйский, Вилюйский и часть Кобяйского районов. Воздушная линия Л-242 связывает Сунтар с Олекминском, который находится в Южно-Якутском энергорайоне, а двухцепная ВЛ-220 кВ связывает Талаканскую ГТЭС, расположенную на юге республики, с Иркутской энергосистемой. Также в состав предприятия ЗЭС входят резервные ДЭС в городах Нюрба, Вилюйск и Верхневилуйск.

В настоящее время основными крупными энергопотребителями являются алмазодобывающая отрасль и нефтеперекачивающие станции. Заметим, что последние 10 лет нефтеперерабатывающая и газодобывающая промышленности Западной Якутии активно развиваются. К наиболее крупным потребителям электроэнергии относятся такие потребители, как нефтеперегонные станции НПС-11,12,13,14 и предприятия АК «АЛРОСА» ПАО – Мирнинский, Айхальский и Удачинский ГОКи. Кроме того, будут подключены новые потребители (компрессорные станции КС-1,2) после окончания строительства и запуска газопровода «Сила Сибири».

Общая зона обслуживания объектов электрических сетей ЗЭС превышает 800 км. Расстояния между наиболее удалёнными объектами потребления и базами РЭС может составлять более 100 км, несмотря на оптимальные 40 км в соответствии с нормативно-технической документацией (НТД).

По состоянию на 01.01.2018 г. на балансе ЗЭС имеет 92 понизительные подстанции (ПС) 35–220 кВ, общей установленной мощностью 2790,49 МВА; ТП 6-10/0,4 кВ – 1447 шт., общей установленной мощностью 444,29 МВА; воздушные линии электропередачи (ВЛ) класса напряжения 0,4–220 кВ (по трассе) – 8729,1 км. Тогда как 10 лет назад [8–9], а именно по состоянию на 01.01.2008 г. на балансе ЗЭС находилось 89 ПС 35–220 кВ, общей установленной мощностью 2500 МВА; ТП 6–10/0,4 кВ – 1057 шт., общей установленной мощностью 110,81 МВА и ВЛ класса напряжения 0,4–220 кВ (по трассе) – 7607 км. В табл. 1 представлены более полные изменения показателей деятельности ЗЭС по состоянию за указанные выше года.

Таблица 1

Динамика технических показателей ЗЭС за последние 10 лет [10]

№ п/п	Наименование	Ед. измерения	Стояло на балансе 01.01.2008г.	Стоит на балансе 01.01.2018г.
1	Общая протяжённость ВЛ, в том числе:	км	7607	8729,1
1.1	220 кВ	км	1344	1149,3
1.2	110 кВ	км	1517	1530,6
1.3	35 кВ	км	1325	1437,1
1.4	10 кВ	км	1715	2103,9
1.5	6 кВ	км	279	374,4
1.6	0,4 кВ	км	1427	2133,8
2	Общее кол-во и мощность ПС, в том числе:	шт./МВА	84/2571,2	92/2790,49

Продолжение таблицы 1

2.1	220 кВ	шт./МВА	5/1031	5/1015
2.2	110 кВ	шт./МВА	43/1500	38/1522,3
2.3	35 кВ	шт./МВА.	40/234	49/253,19
3	Общее кол-во и мощность ТП, в том числе:	шт./МВА	1037/318	1447/444,29
3.1	Комплектные (КТП)	шт./МВА	56/33,89	1300/335,70
3.2	Закрытые (ЗТП)	шт./МВА	43/76,92	123/105,26
3.3	Мачтовые (МТП)	шт./МВА	-	24/3,33

Примечание: указанная протяженность линий соответствует данным ЗЭС (филиал) ПАО «Якутскэнерго», без учета линий, находящихся в аренде и совместном пользовании согласно годовому отчету ПАО «Якутскэнерго».

Географическое расположение Западного энергорайона ПАО «Якутскэнерго» с нанесением ВЛ-220–110 кВ и основных ПС показано на рис. 1, где сплошные зеленые линии – ВЛ-220 кВ, сплошные черные – ВЛ-110 кВ, пунктирные зеленые линии – проектируемые ВЛ-110–220 кВ.

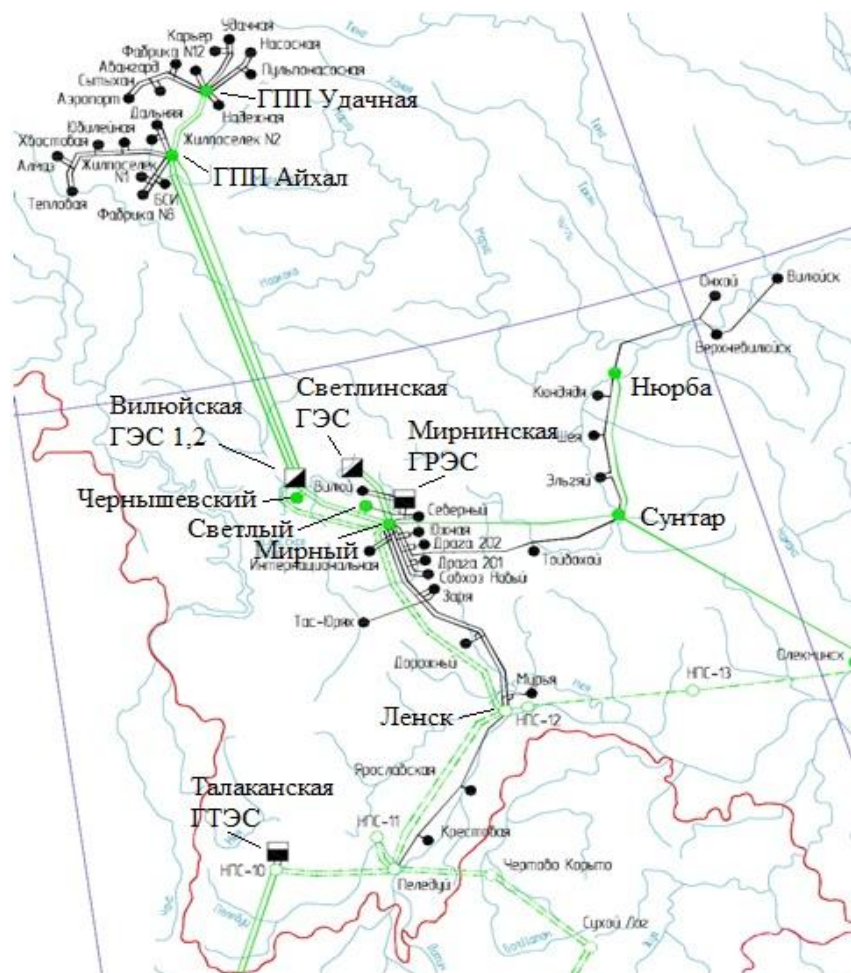


Рис. 1. Географическое расположение районных сетей ЗЭС

Описание проблемы исследования

Современное развитие промышленности Западно-Сибирского региона ведет к росту технических показателей ЗЭС (филиал) ПАО «Якутскэнерго»: увеличению количества и мощностей подстанций различных уровней напряжения, а также общей протяженности линий электропередачи.

Анализ аварийных отключений по причинам выхода из строя электрооборудования на примере ПАО «Якутскэнерго» показал:

- недостатки технической эксплуатации – 4%;
- дефекты монтажа, наладки – 3%;
- недостатки проекта, конструкции – 1%;
- старение оборудования, износ изоляции – 31%;
- атмосферные и природные воздействия – 28%;
- по вине сторонних организаций – 16%;
- прочие – 17%.

При планировании проведения ремонта и мероприятий по технической реконструкции сетевого оборудования в ЗЭС выполняется большой объем работ по диагностике и визуальному осмотру оборудования. Для определения методов и сроков проведения ремонтных работ все оборудование делится на группы по техническому состоянию (% износа): от хорошего технического состояния оборудования (20% износа) до критического (более 80%) – всего на пять групп.

Для определения эксплуатационного состояния основных средств ЗЭС определяется индекс технического состояния. Расчет этого индекса производится по специальной методике в соответствии с проектом Приказа Минэнерго России [11]. Величина, обратная индексу технического состояния, является износом оборудования в процентах, в соответствии с которым оборудование группируется для определения метода и сроков проведения ремонтных работ.

В ЗЭС, как и во всем ПАО «Якутскэнерго», основная часть ВЛ выполнена на деревянных опорах и в процентном соотношении составляет примерно:

- на деревянных опорах – 92%;
- на металлических опорах – 7%;
- на железобетонных опорах – 1%.

При этом на основании обработки, анализа и обобщения статистических данных по электрическим сетям ПАО «Якутскэнерго» определено, 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 одновременно 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, и линии 110 кВ – Л-108, 109, 117, 119 эксплуатируются в «ухудшенном» состоянии и износ воздушных линий, так же как и степень изношенности оборудования подстанций, с каждым годом увеличивается [12].

Методика проведения исследования

Для описания динамики износа электрооборудования ЗЭС были разработаны математические модели на основе законов распределения наработки до отказа и применен пакет программ *MatLab* для проведения математических расчетов и аппроксимации эмпирических функций.

Выбор закона распределения, в значительной мере, процедура неопределенная и во

многое субъективная, при этом многое зависит от априорных знаний об объекте и его свойствах, условиях работы. Очевидно, что выбор распределения будет зависеть, прежде всего, от вида эмпирической функции плотности распределения отказов $f(t)$, а также от вида функции интенсивности отказов $\lambda(t)$. Для оценки надежности энергетических объектов широко применяется экспоненциальный закон распределения. Однако в нашем случае речь идет о «стареющих» объектах, подвергающихся износу. В связи с этим выбираем логарифмически нормальный закон распределения, который описывает наработку до отказа тех объектов, у которых отказ возникает вследствие усталости [13,14].

Если величина $\lg(t)$ имеет нормальное распределение с параметрами математического ожидания (МО) U и среднего квадратичного отклонения (СКО) V , то величина T считается логарифмически нормально распределенной с плотностью распределения отказа, описываемой формулой:

$$f(t) = \frac{1}{V \cdot t \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{\lg(t)-U^2}{2V^2}\right)}.$$

Параметры U и V по результатам статистических данных принимаются равными:

$$U \approx \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \lg(t_i), \quad V \approx \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\lg(t_i) - U)^2.$$

Числовые характеристики, такие как средняя наработка до отказа и её дисперсия, будут соответственно равны:

$$T_0 = e^{\left(U + \frac{V^2}{2}\right)}, \quad D = e^{(2U+V^2)} \cdot (e^{V^2} - 1).$$

Выбранный закон распределения был применен к статистическим данным технического состояния электрооборудования ЗЭС за последние 5 лет (2013–2017 гг.). Вычисления производились в пакете программ *MatLab*, хорошо зарекомендовавшем себя в математических и инженерных расчетах [15].

Результаты исследования

Исходными данными для построения математических моделей являются данные, представленные на рис. 2, где показано увеличение износа основного оборудования ЗЭС соответственно за период 2013–2017 гг. При этом, если износ всех основных фондов колеблется, что указывает на их своевременную частичную модернизацию или капитальный ремонт, то износ ВЛ и оборудования подстанций только растет [16].

В пакете программ *MatLab* на основе проанализированных данных были получены три математические модели (аппроксимированные функции), описывающие динамику износа ВЛ, подстанций и передающего оборудования (рис. 3), две из которых имеют линейную зависимость, а одна – полиномиальную. Для линейных зависимостей МО и СКО соответственно равны:

- для ВЛ: $y=2,16x+58,08$; $R^2=0,9997$;
- для передающего оборудования: $y=2,84x+52,54$; $R^2=0,9907$;

Для полиномиальной зависимости износа оборудования подстанций МО и СКО определяются следующими функциями: $y=-0,3x^3+3,8714x^2-6,9286x+32,14$; $R^2=0,9991$.

Из показанных на рис.3 математических моделей следует, что динамика износа основных средств имеет положительную тенденцию. Рост износа составляет в среднем за год:

- по ВЛ напряжением 110 кВ и выше – 2,2% в год;
- по оборудованию ПС напряжением 110 кВ и выше – 6,3% в год.

Полученные математические модели, описывающие динамику износа электрооборудования ЗЭС, указывают с вероятностью 95% на то, что изнашиваемость данного оборудования будет из года в год только расти [17–20].

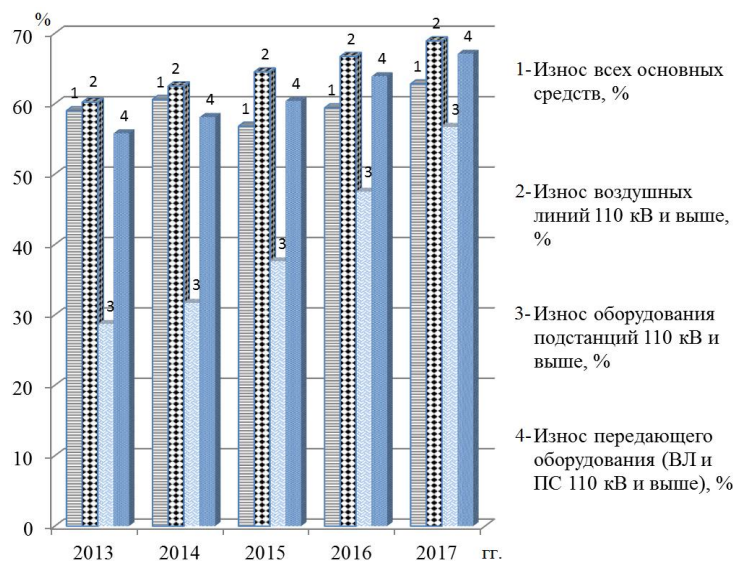


Рис. 2. Анализ износа основных средств ЗЭС

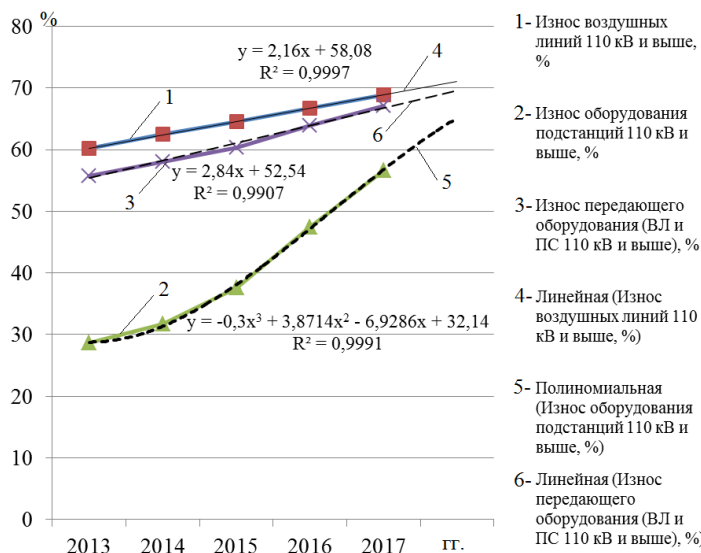


Рис. 3. Математические модели динамики износа электрооборудования ЗЭС

Заключение

В результате проделанной работы был произведен анализ технического состояния электрооборудования западных электрических сетей. Приведены статические данные по износу ВЛ, оборудования ПС и передающего оборудования ЗЭС за 5 лет. Построены математические модели, описывающие динамику износа электрооборудования, которая носит положительный характер.

Существующий уровень затрат на техническое обслуживание и ремонт ВЛ и оборудование ПС напряжением 110 кВ и выше в ЗЭС (филиал) ПАО «Якутскэнерго» не обеспечивает своевременное восстановление работоспособности энергопередающего оборудования и снижение износа этих основных средств. Увеличение затрат на техническое обслуживание и ремонт в существующих тарифных решениях на

электроэнергию в данном регионе не представляется возможным.

Если в ближайшие годы не принять необходимые меры по ремонту и восстановлению основных средств ЗЭС, то с вероятностью 95% оборудование подстанций 110 кВ к 2023 году полностью выйдет из строя.

Литература

1. Китушин В.Г., Иванова Е.В. Планирование ремонтного обслуживания и замены оборудования электрических сетей с учетом фактора надёжности // Проблемы управления. 2011. № 5. С. 46–51.
2. Khudyakov V.V. Increasing the reliability of electric networks // Russian Electrical Engineering. 2011. Vol. 82, is. 9. Pp. 455–459. DOI: 10.3103/S1068371211090070.
3. Басырова Т.Д., Сушков В.В., Плюхин П.С. Исследование надежности нефтепромысловых электрических сетей при различных стратегиях технических обслуживаний и ремонта / Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (16-18 мая 2007 г.). Ч. 1. Тольятти: ТГУ, 2007. С.19–23.
4. Фёдоров О.В. Некоторые особенности структуры систем внутрицехового электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 3 (30). С. 30–33.
5. Федоров О.В., Дарьенков А.Б. Энергосберегающая политика: монография. М.: Издательство «КНОРУС», 2015. – 294 с.
6. Кронгауз Д.Э. Оценка ущербов от перерывов в электроснабжении потребителей // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 6 (45). С. 54–56.
7. Грачева Е.И., Садыков Р.Р. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 1-2. С. 95–101.
8. Волотковская Н.С. Структура и основные технические показатели ЗЭС / Научная молодежь и промышленность: Сб. докл. и тез. М.: Компания «Спутник +», 2007. С. 106–109.
9. Волотковская Н.С. Структура и основные технические показатели Западных ЭС Якутии / Исторические корни и перспективы развития западного региона Якутии: Сб. докл. и тез. регион. науч.- практ. конф. М.: Компания «Спутник +», 2007. С. 149–151.
10. [Электронный ресурс] Рязанцева Г.А., Ефремов Н.Г., Волотковская Н.С. Современное техническое состояние и дальнейшее развитие западных электрических сетей Якутии / Студенческий научный форум 2018: Материалы X Международной студенческой электронной научной конференции. Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2018/3000/4437> (дата обращения: 17.05.2018).
11. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 26.07.2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей». Зарег. в Минюсте РФ 05.10.2017 г. № 48429.
12. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 53–63.
13. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
14. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: «Наука», 1965. 524 с.
15. Семёнов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 8. С. 56–64. DOI: 10.17513/snt.36780.
16. Грачева Е.И., Сафин А.Р., Садыков Р.Р. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей // Надежность

и безопасность энергетики. 2017. Т. 10, № 1. С. 48–52.

17. Malafeev A., Iuldasheva A. Short-circuit failures simulation for evaluation of structural reliability of power supply systems // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129. Pp. 433–439. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.145.

18. Rao M.M., Thomas M.J., Singh B.P. Transients induced on control cables and secondary circuit of instrument transformers in a GIS during switching operations // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. Vol. 22, Is. 3. Pp. 1505–1513. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.901292.

19. Roser M., Stumberger G. Improving the power supply reliability in resonant earthed systems by fault current path control established through faulted phase earthing switch // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015. Vol. 64. Pp. 714–722. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.07.068.

20. Ustinov D.A., Baburin S.V. Synthesis procedure of the power supply systems topology at mineral resource enterprises based on logical-probabilistic assessments // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11, Is. 9. Pp. 6402–6406.

Авторы публикации

Волотковская Наталья Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета (СВФУ) имени М.К. Аммосова в г. Мирном. E-mail: volotkovska_n@mail.ru.

Семёнов Александр Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета (СВФУ) имени М.К. Аммосова в г. Мирном. E-mail: sash-alex@yandex.ru.

Федоров Олег Васильевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Управление инновационной деятельностью» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) имени Р.Е. Алексеева. E-mail: fov52@mail.ru.

References

1. Kitushin V.G., Ivanova E.V. // *Problemy Upravleniya*. 2011. № 5. Pp. 46–51.
2. Khudyakov V.V. // *Russian Electrical Engineering*. 2011. Vol. 82, is. 9. Pp. 455–459. DOI: 10.3103/S1068371211090070.
3. Basyrova T.D. Sushkov V.V. Plyuhin P.S. Issledovanie nadezhnosti neftepromyslovyh ehlektricheskikh setej pri razlichnykh strategiyah tekhnicheskikh obsluzhivaniy i remonta / *Problemy ehlektrotekhniki, ehlektroehnergetiki i ehlektrotekhnologii: Trudy II Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (16-18 maya 2007 g.)*. CH. 1. – Tol'yatti: TGU, 2007. Pp. 19–23.
4. Fedorov O.V. // *Reliability and safety of energy*. 2015. № 3 (30). Pp. 30–33.
5. Fedorov O.V., Daryenkov A.B. *Energy saving policy: monograph*. – Moscow: Publishing House "Knorus", 2015. – 294 p.
6. Krongauz D.Eh. // *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2017. № 6 (45). Pp. 54–56.
7. Gracheva E.I., Sadykov R.R. // *Proceedings of Higher Educational Establishments. Energy Problems*. 2017. V. 19, № 1-2. Pp. 95–101.
8. Volotkovskaya N.S. *Struktura i osnovnye tekhnicheskie pokazateli WES / Nauchnaya molodezh' i promyshlennost': Sb. dokl. i tez.* – M.: Kompaniya "Sputnik +", 2007. Pp. 106–109.
9. Volotkovskaya N.S. *Struktura i osnovnye tekhnicheskie pokazateli Zapadnyh ES Yakutii / Istoricheskie korni i perspektivy razvitiya zapadnogo regiona YAKutii: Sb. dokl. i tez. region. nauch.-prakt. konf.* – M.: Kompaniya "Sputnik +", 2007. Pp. 149–151.
10. [Electronic resource] Ryazanceva G.A., Efremov N.G., Volotkovskaya N.S. *Sovremennoe*

tekhnicheskoe sostoyanie i dal'nejshee razvitie zapadnyh ehlektricheskikh setej YAkutii / Studencheskij nauchnyj forum 2018: Materialy X Mezhdunarodnoj studencheskoj ehlektronnoj nauchnoj konferencii. Access mode: <http://www.scienceforum.ru/2018/3000/4437> (date of the application: 17.05.2018).

11. Prikaz Ministerstva ehnergetiki Rossijskoj Federacii ot 26.07.2017 № 676 “Ob utverzhdenii metodiki ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i liniy ehlektrperedachi ehlektricheskikh stancij i ehlektricheskikh setej”. Zareg. v Minyuste RF 05.10.2017 № 48429.

12. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. // Proceedings of Higher Educational Establishments. Energy Problems. 2016. № 1-2. Pp. 53–63.

13. Reliability of technical systems: reference book / Yu.K. Belyaev, V.A. Bogatyrev, V.V. Bolotin and others; Ed. I.A. Ushakov. – Moscow: Radio and Communication, 1985. – 608 p.

14. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Soloviev A.D. Mathematical methods in reliability theory. – Moscow: Nauka, 1965. – 524 p.

15. Semenov A.S., Yakushev I.A., Egorov A.N. Mathematical modeling of technical systems in MATLAB // Modern high technologies. 2017. № 8. Pp. 56–64. DOI: 10.17513/snt.36780.

16. Gracheva E.I., Safin A.R., Sadykov R.R. // Safety & Reliability of Power Industry. 2017. V. 10, № 1. Pp. 48–52.

17. Malafeev A., Iuldasheva A. // Procedia Engineering. 2015. V. 129. Pp. 433–439. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.145.

18. Rao M.M., Thomas M.J., Singh B.P. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22, Is. 3. Pp. 1505–1513. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.901292.

19. Roser M., Stumberger G. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. V. 64. Pp. 714–722. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.07.068.

20. Ustinov D.A., Baburin S.V. // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. V. 11, № 9. Pp. 6402–6406.

Authors of the publication

Natalia S. Volotkovskaya – PhD in Engineering sciences, Associate Professor NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny, Mirny, Russia. E-mail: volotkovska_n@mail.ru.

Alexander S. Semenov – PhD in Physico-mathematical sciences, Associate Professor, Head the Department NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny, Mirny, Russia. E-mail: sash-alex@yandex.ru.

Oleg V. Fedorov – Grand PhD in Engineering sciences, Professor NNTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: fov52@mail.ru.

Поступила в редакцию

07 августа 2018 г.