

Electrical Complexes and Systems
Электротехнические комплексы и системы

EDN: MOAVXR

УДК 621.311

**A Prospective Assessment
of the Functioning Electric Networks Reliability
(Using the Example of the PJSC Rosseti Volga –
Saratov Distribution Networks Branch)**

Igor V. Naumov*

*Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Yezhevsky
Irkutsk, Russian Federation*

Received 19.01.2024, received in revised form 21.02.2024, accepted 28.03.2024

Abstract. The purpose of the article presented to the readers is an analytical assessment of the transport of electric energy through the distribution networks of one of the branches of PJSC Rosseti Volga – Saratov Distribution Networks. The article is a continuation of the research cycle on the reliability of electric power transmission through power transmission systems of PJSC ROSSETI. The information published in the open press is used as the source data. The structure of the company, the characteristics of the main elements of the studied electric networks are considered, as well as a quantitative assessment of emergency situations and the amount of under-discharge of electric energy caused by power supply interruptions that occurred during the period from 2015 to 2023. The classification of the causes of failures is given and a quantitative assessment of each group of failures and their percentage ratio is established. Based on the data obtained, a prognostic assessment of possible emergency shutdowns, as well as their consequences in the studied electrical networks in the near future, was made. The technologies of statistical methods, in particular regression analysis, were used as a methodological basis for creating predictive models. The autoregression equations of the studied accident rates for each month of 2024 are obtained, on the basis of which the forecast values of these indicators are calculated. General scientific methods as well as numerical methods of analysis were used in the research. Excel technologies and the MATLAB graphics editor were used to visualize the obtained analysis results. The results obtained may be of interest to the heads of power grid companies, as well as researchers and engineers engaged in research in the field of reliability of power supply.

Keywords: failure, power grid equipment, under-supply value, equipment damage, preventive assessment.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: professorsnaumov@list.ru

Acknowledgements. The author expresses gratitude to the management of the branch of PJSC Rosseti Volga – Saratov Distribution Networks for the materials provided, which formed the basis for the analysis of the company’s activities.

Citation: Naumov I. V. A prospective assessment of the functioning electric networks reliability (using the example of the PJSC Rosseti Volga – Saratov distribution networks branch). J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(3), 360–377. EDN: MOAVXR



Перспективная оценка надежности функционирования электрических сетей (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Саратовские распределительные сети»)

И. В. Наумов

*Иркутский национальный исследовательский
технический университет*

*Иркутский государственный аграрный университет
имени А. А. Ежовского
Российская Федерация, Иркутск*

Аннотация. Цель статьи – аналитическая оценка транспорта электрической энергии по распределительным электрическим сетям одного из филиалов ПАО «Россети Волги» – «Саратовских распределительных сетей». Статья является продолжением цикла исследований уровня надежности передачи электрической энергии по системам электропередачи ПАО «Россети». В качестве исходных данных использована информация, опубликованная в открытой печати. Рассмотрены структура компании, характеристика основных элементов исследуемых электрических сетей, а также произведена количественная оценка аварийных ситуаций и величины недоотпуска электрической энергии, обусловленной перерывами электроснабжения, возникших за период с 2015 по 2023 гг. Приведена классификация причин возникновения отказов и установлена количественная оценка каждой группы отказов и их процентное соотношение. На основе полученных данных произведена прогностическая оценка возможных аварийных отключений, а также их последствий в исследуемых электрических сетях на ближайшую перспективу. В качестве методологической базы для создания прогностических моделей использовались технологии статистических методов, в частности регрессионный анализ. Получены уравнения авторегрессии исследуемых показателей аварийности для каждого месяца 2024 г., на основе которых произведен расчёт прогнозных значений этих показателей. При выполнении исследования использованы общенаучные методы, а также численные методы анализа. Для визуализации полученных результатов анализа использовались технологии Excel, а также графического редактора MATLAB. Полученные результаты могут представлять интерес для руководителей электросетевых компаний, а также научных работников и инженеров, занимающихся исследованиями в области надежности электроснабжения.

Ключевые слова: отказ, электросетевое оборудование, недоотпуск, повреждение оборудования, превентивная оценка.

Благодарности. Автор выражает признательность руководству филиала ПАО «Россети Волги» – «Саратовские распределительные сети» за предоставленные материалы, которые легли в основу анализа деятельности этой компании.

Цитирование: Наумов И. В. Перспективная оценка надежности функционирования электрических сетей (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Саратовские распределительные сети» / И. В. Наумов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(3). С. 360–377. EDN: MOAVXR

Введение

Электропередача является сложной, многоплановой задачей, решение которой – наиболее важный критерий оценки эффективности использования электрической энергии (ЭЭ) в электроэнергетических системах. При этом поиски путей совершенствования передачи ЭЭ характеризуют наиболее ответственную функцию электроэнергетической отрасли – сокращение всех видов ущерба в результате возникновения несанкционированных отказов при электроснабжении. Особенностью электроснабжения в Российской Федерации, по сравнению с другими странами, является транспортировка ЭЭ на очень большие расстояния, что сопровождается комплексом дополнительных задач, связанных с поиском технических решений, направленных на повышение уровня надежности и безопасности электроснабжения. При этом необходимо учитывать общеизвестный факт, что степень износа элементов электрических сетей, а также основных и дополнительных средств управления процессом электропередачи к настоящему времени достигает критических значений. Подавляющее большинство линий электропередачи по всем субъектам электросетевого распределения, занимающихся процессом доставки ЭЭ потребителю, построено более 50 лет назад. Современное сетевое строительство ЛЭП различных уровней номинального напряжения производится крайне недостаточно. При этом уровень износа по отдельным электросетевым компаниям превышает 70 %. В целом, по опубликованным данным, на 01.01.2020 г. износ основного электросетевого оборудования (ЛЭП и ПС) по ПАО «Россети» составил 53,1 %; по ПАО «ФСК ЕС» – 52,2 % [1].

Следует отметить, что уровень электропотребления в нашей стране увеличивается, и будет возрастать год от года. Это связано с увеличивающимися темпами развития всех отраслей хозяйственной деятельности государства. По опубликованным данным, спрос на электрическую энергию по ЕЭС России к концу 2027 г. оценивается в размере 1159,905 млрд кВт·ч, что больше объема потребления электрической энергии в 2020 г. на 126,187 млрд кВт·ч. [2]. При этом следует учитывать и продолжающуюся специальную военную операцию, требующую значительных дополнительных энергетических затрат при производстве гигантского количества военной продукции.

Наиболее уязвимым способом транспортировки ЭЭ является ее передача посредством воздушных линий электропередачи (ЛЭП), поскольку именно этот способ зависит от многочисленных факторов, связанных с особенностями территориальных и климатических ограничений, условиями эксплуатации, а также степенью старения и износа основных элементов электрических сетей (ЭС).

Одним из вариантов повышения уровня надежности электроснабжения является разработка мероприятий, снижающих или предупреждающих последствия аварийных ситуаций, что невозможно без создания прогнозных (превентивных) моделей возникновения отказов в ЭС. Прогнозирование уровня отказов при транспорте электроэнергии во многом снижает риски перерывов электроснабжения в силу превентивной разработки противоаварийных мероприятий, осуществляемых на основе прогностической информации о развитии таких ситуа-

ций. Это, соответственно, способствует не только повышению эффективности использования ЭЭ, но также и сохранности элементов электрических сетей и основного электрооборудования, повышению их «живучести». В опубликованных литературных источниках вопросам прогнозирования аварийных отказов в электрических сетях посвящено достаточное количество исследований [3–11]. Автором также рассматривались вопросы превентивной оценки развития аварийных ситуаций в отдельных электросетевых структурах ПАО Россети [12–16].

В основе методов вероятностного анализа электроэнергетических задач лежат достаточно глубоко проработанные и сформированные преобразования систем случайных параметров. В результате расчеты режимов работы технических систем с учетом вероятностной природы их параметров зачастую сводятся к детерминированным расчетам, например, в качестве исходных данных рассматриваются средние значения наблюдаемых величин.

Для создания прогнозных моделей исследуемых параметров наиболее часто используют статистические методы и методы интеллектуального анализа данных (методы Data Mining). При этом к статистическим методам относятся методы теории вероятностей и математической статистики; регрессионного анализа; максимального правдоподобия, экстраполяции временных рядов и др. Для оценки многих случайно изменяющихся параметров используются законы распределения вероятностей, среди которых можно отметить нормальное, гамма, Вейбулла, Пирсона III типа, трехпараметрическое степенное и др. Но при этом одним из условий построения закона распределения вероятностей является отсутствие автокорреляционной связи между значениями исследуемого параметра.

В случае когда значение коэффициента превышает 0,7, можно говорить о наличии сильной внутрирядной связи, позволяющей строить авторегрессионные уравнения и осуществлять прогноз исследуемого показателя. В этом случае уместно использовать кибернетические методы Data Mining, в которых применяются основы компьютерной математики и технологии искусственного интеллекта. В число таких методов входят: эволюционное программирование, использование искусственных нейронных сетей, системы обработки экспертных знаний. В данной статье для построения прогнозных моделей рассматривается возможность использования как статистических методов прогнозирования, так и методов искусственных нейронных сетей (НС) как наиболее чаще используемых в превентивной оценке событий в электроэнергетических системах. При этом в качестве средства создания НС выбрана среда моделирования MATLAB, поскольку она является простой в использовании и обладает высокой скоростью работы [4, 17–20].

Таким образом, *целью* настоящей статьи является прогностическая оценка возникновения аварийных ситуаций на краткосрочную перспективу в электрических сетях одного из филиалов ПАО «Россети Волги» – «Самарских распределительных сетей». В качестве основных *задач*, решение которых позволяет достичь указанной цели, сформулировано следующее: дать характеристику исследуемых распределительных сетей; рассмотреть уровень повреждаемости и интенсивность возникающих отказов с точки зрения количества недопоставленной электроэнергии; оценить количественное изменение аварийных ситуаций по причинам их возникновения; рассмотреть возможность использования различных методов прогнозирования для превентивной оценки возникновения событий отказов в исследуемых электрических сетях.

Структурно-балансовая характеристика исследуемого объекта

«Саратовские распределительные сети» (далее по тексту – Сети) зарегистрированы 21 марта 2008 г. в качестве филиала единой операционной компании ОАО «МРСК Волги», которая с 5 мая 2014 г. получила название ПАО «Россети Волги» (далее по тексту – ПАО) [21].

В настоящее время сети компании представлены 7 производственными отделениями, в состав которых входит 38 районных электрических сетей [22]. Территория, по которой трассируются Сети, занимает 2 место (после сетей «Оренбургэнерго») среди 7 филиалов ПАО. Эта площадь составляет 101,235 тыс. км² (25 % от территории охвата всеми сетями ПАО), на которой проживает 2431 тыс. человек (20,5 % всего населения, обслуживаемого ПАО) [23]. По опубликованным данным, электропотребление на территории Самарской области на конец 2022 г. составило 13054 млн кВт·ч. [23], а к 2029 г. составит 15999 млн кВт·ч., со среднегодовым темпом прироста 3,03 % [24]. Необходимое количество электрической энергии (ЭЭ) производится на 11 электростанциях области (включая: 1 АЭС, 1 ГЭС, 1 ГРЭС, 4 ТЭЦ, 1 блок-станцию собственных нужд и 3 солнечных – СЭС), общей мощностью 6598 МВт [25], которые на конец 2022 г. произвели 45128,3 млн кВт·ч. При этом отпуск ЭЭ потребителям из Сетей в границах балансовой и эксплуатационной ответственности составил 8907,64 млн кВт·ч (18,15 % от аналогичного отпуска ЭЭ ПАО в целом) [23].

На балансе Сетей находится более 260 подстанций (ПС) 35–110 кВ и более 5000 ПС 10/0,4 кВ (до 10 % количества ПС ПАО). Общая протяженность электрических сетей всех напряжений составляет 70 507 км (около 30 % всех сетей ПА) [23], из них линии электропередачи (ЛЭП) 500 кВ – 986 км; 220 кВ – 1716,2 км, 110 кВ – 6687,9 км, 35 кВ – 4796,5 км, 0,4–10 кВ – 56 320,7 км. [25], при этом дополнительный ввод в эксплуатацию ЛЭП в 2022 г. составил: 0,4 кВ – 2,8 км; 6–20 кВ – 7,1 км; 35 кВ и выше – 2,5 км [16].

Общая характеристика повреждаемости исследуемых Сетей и причин возникновения отказов

Известно, что для оценки уровня надежной доставки ЭЭ потребителю используются несколько показателей¹. К ним относятся: системный показатель средней продолжительности прекращения передачи электрической энергии на точку поставки, ч/год и среднее количество отключений потребителей в год, г.⁻¹ [27]:

$$SAIDI = \frac{\sum(T_i \cdot N_i)}{\sum N_i}; \quad SAIFI = \frac{\sum(\omega_i \cdot N_i)}{\sum N_i},$$

где N_i – количество потребителей i -го участка фидера, шт.; i – количество участков фидера, шт.; T_i – время перерыва электроснабжения потребителей i -го участка фидера; ω_i – количество отключений потребителей i -го участка фидера, откл./год.

Значения этих показателей определяются специфическими особенностями, относящимися к каждой конкретной электроэнергетической системе как в Российской Федерации, так и за ее пределами. По опубликованным данным, значение $SAIDI$ и $SAIFI$ в некоторых странах составляют соответственно: США – 240 и 1,5; Австрия – 72 и 0,9; Дания – 24 и 0,5; Франция

¹ $SAIDI = I_{SAIDI}$ – System Average Interruption Duration Index; $SAIFI = I_{SAIFI}$ – System Average Interruption Frequency Index

62 и 1,0; Германия – 23 и 0,5; Италия – 58 и 2,2; Нидерланды – 33 и 0,3; Испания – 104 и 2,2; Великобритания – 90 и 0,8 [28]. Особенности, определяющие значение этих индексов, в первую очередь связаны с климатическими характеристиками территорий, по которым трасируются линии электропередачи (ЛЭП). Кроме того, большое значение имеет срок ввода электрической сети в эксплуатацию, то есть старение элементов электрических сетей, а также режимы их работы при эксплуатации – износ электросетевого оборудования. Территории Российской Федерации и большинства стран ближнего зарубежья значительно превышают масштабы территориального пространства стран Европейского Союза. Соответственно, масштабы перерывов электроснабжения и недоотпуска электроэнергии потребителям значительно разнятся. Например, по электрическим сетям ПАО Россети за 2016 г. Psaidi (аварийные отключения) отключение составило 2,69 ч.; Psaidi (плановые отключения) составило 16,95 ч. [29]. На конец декабря 2020 г., согласно отчету [30], показатель SAIDI по ПАО Россети снижен на 22 %, по сравнению с 2019 г. Согласно [31], среднее значение индекса продолжительности перерывов в электроснабжении в год (SAIDI) в сетях ПАО «Россети» составляет 4,367 часов в год, значение количества перерывов в электроснабжении (SAIFI) – 1,35. Программа инновационного развития ПАО «Россети» предусматривает снижение показателей SAIDI и SAIFI на 60 % благодаря внедрению системы автоматизации распределительных электрических сетей 15 кВ. Согласно результатам расчетов, внедрение реклоузеров является эффективным способом повышения надежности электроснабжения, а также перспективным решением для реновации сетей ПАО «Россети» с целью достижения плановых значений индикативных показателей SAIDI и SAIFI.

По данным [29], за 2020 г. значение показателей P_{saidi} и P_{saifi} по Сетям составили соответственно 0,7417 и 0,8214, что меньше усредненных значений аналогичных показателей в целом по ПАО за этот же год (на 23 и 2,3 % соответственно). По данным годового отчёта ПАО, за 2022 г. значения по указанным показателям отсутствуют, но по данным отчёта ПАО за 2021 г. указано, что общее снижение показателя P_{saifi} по ПАО в 2021 г., как и по подавляющему большинству филиалов (за исключением Самарского филиала), составило более 30 % [32]. При этом следует отметить, что из 7 филиалов ПАО именно Сети находятся в наиболее работоспособном состоянии, поскольку доля оборудования и ЛЭП Сетей со сверхнормативным сроком службы составляет всего 26,48 и 20,54 % соответственно. Для сравнения в других филиалах ПАО «Россети Волги»: Самарские сети – 36,2 и 21,82 %; сети «Чуваэнерго» – 60,08 и 40,84 %; «Мордовэнерго» – 69,99 и 63,6 %; «Пензаэнерго» – 79,4 и 49,9 %; Ульяновские сети – 70,9 и 59,67 %; «Оренбургэнерго» – 71,27 и 72,94 % [33].

На основании опубликованных данных [23] произведен учет возникновения аварийных отключений и общего объема недоотпущенной ЭЭ за время этих отказов за период 2015–2023 гг. Результаты расчетов по аварийным ситуациям представлены в табл. 1 и рис. 1.

Анализ табл. 1 и рис. 1 показал следующее. Общее количество аварийных отключений за исследуемый период составило 44165 шт. Из них наибольшее количество отключений пришлось на 2016 г. – 41,2 % (18199 шт.). Наименее «повреждаемым» следует считать 2017 г. – 1,89 % (843 отказа). И необходимо отметить, что динамика возникающих отказов после 2017 г. примерно находится на одном уровне: 2018 г. – 12,73 %; 2019 г. – 9,2 %; 2020 г. – 8,2 %; 2021 г. – 7,29 %; 8,29 % и 2023 г. – 8,37 %. Общее количество недопоставленной ЭЭ в результате указанных отка-

Таблица 1. Количество аварийных отключений и объём недоотпуска электрической энергии в Саратовских распределительных сетях за 2015–2023 гг.

Table 1. Number of emergency shutdowns and the volume of under-supply of electric energy in Saratov distribution networks for 2015–2023

Количество отказов, шт./Величина недоотпуска, тыс. кВт·ч.									
Год / Месяц	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Январь	101/ 59,364	1572/ 52,665	92/ 47,145387	694/ 74,037282	295/ 24,823585	215/ 10,430963	163/ 18,5427	260/ 8,3015	224/ 7,5168
Февраль	81/ 44,273	1520/ 30,046	43/ 24,641162	585/ 117,02927	340/ 29,873881	243/ 11,276072	187/ 6,6807	294/ 74,5024	289/ 7,8839
Март	69/ 43,859	1652/ 43,169	54/ 64,290301	445/ 23,91463	422/ 30,277523	288/ 39,853812	241/ 11,7658	562/ 299,0644	320/ 8,7780
Апрель	82/ 42,231	1584/ 28,047	53/ 16,350848	558/ 24,81779	450/ 38,306817	449/ 38,080815	319/ 21,6261	400/ 18,5862	415/ 36,4296
Май	124/ 40,672	1546/ 45,833	77/ 25,203598	804/ 29,239134	401/ 37,531918	398/ 37,561851	260/ 14,9350	169/ 6,6892	303/ 9,1728
Июнь	178/ 75,708	1516/ 46,302	98/ 48,101308	435/ 22,589102	301/ 12,805093	301/ 18,036468	143/ 19,3149	125/ 4,1449	293/ 8,7670
Июль	144/ 43,018	1420/ 29,648	78/ 21,038285	470/ 27,115183	339/ 16,479115	418/ 192,322	360/ 36,5864	402/ 32,4611	376/ 27,7392
Август	140/ 31,544	1516/ 30,583	102/ 92,401393	401/ 32,911268	411/ 25,506982	255/ 18,797939	255/ 8,0993	245/ 6,0167	221/ 16,8358
Сентябрь	114/ 49,317	1431/ 37,643	91/ 17,153267	397/ 37,791734	313/ 9,172196	213/ 9,40357	227/ 8,4657	246/ 8,4427	241/ 21,0695
Октябрь	51/ 26,168	1346/ 16,062	34/ 10,931051	256/ 12,395765	264/ 10,031713	190/ 14,7909	203/ 10,9036	301/ 11,4159	369/ 16,3540
Ноябрь	52/ 15,686	1590/ 15,685	46/ 9,892268	302/ 17,992304	261/ 18,093776	189/ 12,0635	285/ 16,6128	304/ 12,8827	315/ 55,4532
Декабрь	105/ 51,435	1506/ 31,816	66/ 61,625051	276/ 22,335373	268/ 16,161571	463/ 38,6012	578/ 45,6428	355/ 9,0478	349/ 25,4981

зов составило 3474,2292 тыс. кВт·ч, при этом наибольшая величина недоотпуска соответствует 2015 г. – 15,06 % (523,275 тыс. кВт·ч), а наименьшая – 2021 г. (6,3 % – 219,1758 тыс. кВт·ч).

Динамика величины недоотпуска ЭЭ в результате аварийных отключений за исследуемый период представлена на рис. 2.

Анализ причин возникновения событий отказов произведен за год: с 3 по 4 кварталы 2022 г. (с июля по декабрь) и за 1 и 2 кварталы 2023 г. (с января по июнь).

В процессе анализа вся совокупность причин возникновения отказов была укрупнена по 6 основным характерным признакам: 1 группа – **3.4.7** – несоблюдение сроков или (и) объёмов выполнения технического обслуживания и ремонта оборудования и элементов электрических сетей; 2 группа – **3.4.8** – воздействие посторонних лиц и организаций, не участвующих в технологическом процессе; 3 группа – **3.4.9** – воздействие организаций, участвующих в технологическом процессе; 4 группа – **3.4.10** – воздействие животных и птиц – проникновение в электроустановки (перекрытие изоляции, нарушение изоляции); 5 группа – **3.4.12** – воздействие повторяющихся стихийных явлений: длительное воздействие ветровой нагрузки,

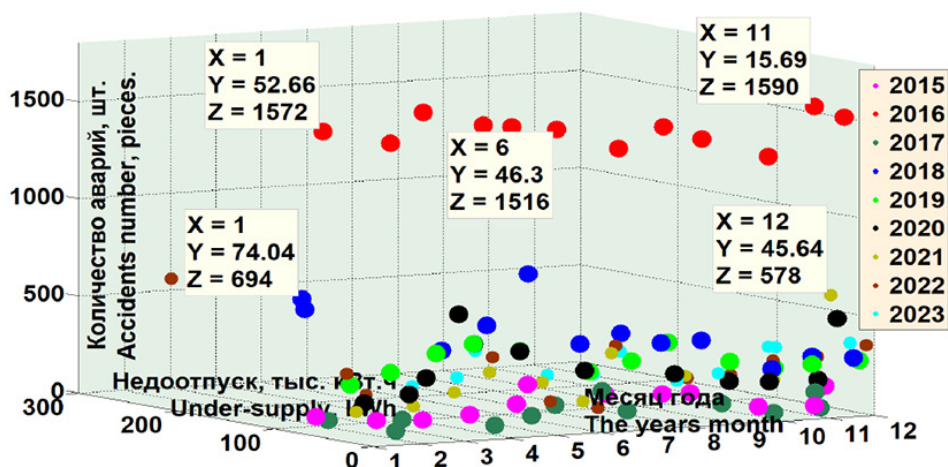


Рис. 1. Изменение количества аварийных ситуаций и их последствий в исследуемых Сетях

Fig. 1. Changes of the emergencies number and their consequences in the studied Networks

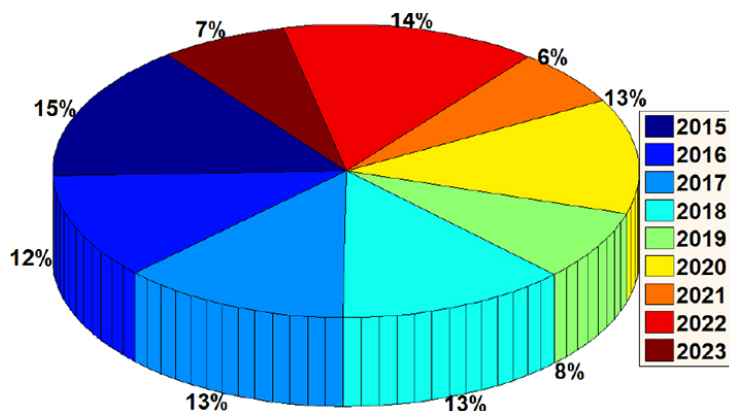


Рис. 2. Процентное соотношение количества недопоставленной электроэнергии в результате аварийных отключений в «Саратовских распределительных сетях» за 2015–2023 гг.

Fig. 2. Percentage of the under-supplied electricity amount as a result of emergency outages in Saratov distribution networks for 2015–2023

механическое воздействие при падении деревьев, веток, внешнее механическое воздействие, атмосферное перенапряжение, гроза и пр.; 6 группа – 3.4.13 – дефекты (недостатки) проекта, конструкции, изготовления, монтажа – недостатки конструкции; 7 группа – 3.4.14 – не выявленные причины.

Результаты анализа количества отказов по указанным причинам представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Анализ данных табл. 2 следующий. Суммарное количество отказов за исследуемый период (с 1 июля 2022 г. по 30 июня 2023 г.) составило 3678 шт. При этом недоотпуск ЭЭ за указанный период составил 158,8573 тыс. кВт·ч. Как видно из табл. 2, наибольшей интенсивностью характеризуются отказы по первым 5 причинам. Количество отказов по указанным группам причин распределилось следующим образом: 1 группа – 12,43 % всех отказов за этот период,

Таблица 2. Распределение количества отказов по группам причин их возникновения

Table 2. Distribution of the failures number by groups of their occurrence causes

Месяц года	Группы причин						
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Июль	38	94	78	22	182	7	1
Август	19	83	40	31	62	1	1
Сентябрь	29	75	47	21	72	1	1
Октябрь	36	65	66	8	80	1	7
Ноябрь	38	78	63	8	109	6	2
Декабрь	48	114	99	6	83	3	5
Январь	44	89	43	7	47	0	0
Февраль	40	83	46	19	82	1	0
Март	37	107	82	10	94	0	0
Апрель	39	110	112	9	145	1	0
Май	52	104	80	11	59	9	0
Июнь	37	93	93	8	42	5	3

при этом наибольшее количество произошло в *мае* (11,4 %), а наименьшее – в *августе* (4,2 %). *2 группа* – 29,8 %. В этой группе наиболее чаще отказы происходили в *декабре* (10,4 %). Вместе с этим следует отметить и месяцы *март*, *апрель* и *май*, в которых также происходило большое количество аварийных отключений – 9,77 %; 10,05 % и 9,5 % соответственно. Наименьшее количество отказов по этим причинам происходило в *октябре* – 5,9 %. Отказы *3 группы* составили 23,08 %. При этом наиболее «повреждаемым» месяцем является *апрель* (13,2 %), а наименее – *август* (4,7 %). На *4 группу* приходится 4,35 % всех отказов за год. Наибольшее их количество по этим причинам соответствует *августу* (19,4 %), наименьшее – *декабрю* (3,75 %). По *5 группе* причин отказов (28,74 %) наибольшее количество произошло в *июле* (17,2 %), наименьшее – в *январе* (4,45 %). Следует отметить, что достаточно большое количество отказов по этим причинам происходило и в *апреле* (13,7 %), и в *ноябре* (10,3 %). На *6 группу* причин приходится 0,95 % всех годовых отказов. Их наибольшее количество произошло в *мае* (25,7 %), наименьшее – в *феврале*, *апреле*, *августе*, *сентябре* и *октябре* (по 2,86 %). При этом в *январе* и *марте* отказов по этим причинам не возникало. К *7 группе* отказов относится всего 0,68 % всех годовых отказов. Наибольшее число этих отказов произошло в *октябре* (28 %), наименьшее – в *июле* и *сентябре* (по 4 %). В *январе*, *марте*, *апреле* и *мае* отказов этой группы не происходило.

Таким образом, повреждаемость исследуемых Сетей по указанным группам причин распределилась следующим образом: 1 место – отказы 2 группы (1095 шт.– 29,8 %); 2 – отказы 5 группы (1057 шт.– 28,74 %); 3 – отказы 3 группы (849 шт.– 23,08 %), на 4 месте – отказы 1 группы (457 шт.– 12,43 %), на 5 – месте отказы 4 группы (160 шт.– 4,35 %). Последнее место занимают отказы 6 и 7 групп. На долю этих отказов суммарно приходится 1,63 % – 60 шт.

Прогнозирование повреждаемости исследуемых электрических Сетей

Как уже было отмечено выше, получение прогностических моделей возникновения возможных аварийных ситуаций в значительной степени способствует эффективности планируемых ПАМ. Рассмотрим возможность создания прогнозных оценок развития аварийных ситуаций на 2024 г. по каждому месяцу года. В качестве основной информации будем использовать данные табл. 1. Как видно из этих данных, в среднем за период наиболее «повреждаемым» месяцем можно считать *апрель* (9,76 % всех отказов), а менее – *октябрь* (6,67 %). При этом следует отметить, что с точки зрения интенсивности отказов наибольший недоотпуск ЭЭ соответствует *марту* месяцу (16,26 % общего объема недопоставленной ЭЭ), а наименьший – также *октябрю* – 3,71 %.

Прежде чем переходить к рассмотрению некоторых ресурсов создания прогностических оценок функционирования рассматриваемых Сетей, следует оценить имеющуюся выборку данных для осуществления прогноза. Как видно, массив данных состоит всего из 9 значений – данных с 2015 по 2023 гг. При этом отчетливо видно, что данные по отказам, приходящимся на 2016 г., более чем в 4 раза превышают, а данные по отказам за 2017 г. в такое же количество раз меньше данных по значениям отказов, приходящихся на остальные года исследуемого интервала. Данные по отказам за 2015 г. также существенно отличаются от подавляющего количества отказов, приходящихся на другие года. Для получения более достоверной картины прогноза исключим из массива данных значения количества отказов за эти три года, оставив для анализа выборку данных по отказам за последние 5 лет – с 2018 по 2023 гг. Таким образом, массив данных сокращается до 6 значений для каждого месяца года. Такого количества явно не хватает для корректной превентивной картины изменения любой величины. Исходный массив данных по недоотпуску ЭЭ состоит из достаточно близких значений, поэтому необходимости исключать значения величины недоотпуска для определенного года не возникает. В связи с этим для получения прогнозных моделей будем использовать весь массив данных – по 9 значений для каждого месяца года. Но и этого количества выборки данных также недостаточно для получения адекватного прогноза величины недоотпуска.

Для увеличения количества данных выборки по отказам и недоотпуску использована программа «*Interpolation*»², позволяющая производить линейную, билинейную и бикубическую интерполяции. Используя указанный ресурс, из 6 значений первоначальной выборки, при шаге интерполяции, равном 20, получено по 120 значений отказов и по 180 значений величины недоотпуска ЭЭ для каждого месяца года.

Для выявления корреляционной зависимости между значениями выборки или опровержения этой гипотезы применяют коэффициент автокорреляции, вычисляемый по формуле [17]:

$$R_{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} [(x_i - \bar{x}_i) \cdot (x_{i+\tau} - \bar{x}_{i+\tau})]}{\sigma_i \cdot \sigma_{i+\tau} \cdot (n - \tau - 1)},$$

где n – объём выработки; τ – порядок сдвига, изменяющийся от 0 до m ($\tau = 0, 1, 2, \dots, m$); x_i – значения ряда от x_1 до $x_{n-\tau}$; \bar{x}_i и σ_i – среднее значение и стандарт для части выборки от 1 до $(n - \tau)$;

² Программа написана с использованием среды MATLAB и в настоящее время проходит процедуру государственной регистрации.

$x_{n+\tau}$ – значения ряда от $x_{n+\tau}$ до x_n ; $\overline{x_{n+\tau}}$ и $\sigma_{n+\tau}$ – среднее значение и стандарт для выборки размером от $1+n$ до n .

Известно, что если значение коэффициента R_t превышает величину 0,7, то между численными значениями величин выборки данных имеет место сильная внутрирядная связь, позволяющая с достаточной вероятностью осуществлять нахождение авторегрессионных уравнений и определять с их помощью прогнозные значения исследуемых показателей. Кроме того, при высоких значениях коэффициента автокорреляции для построения прогнозных моделей можно также использовать и кибернетические методы, в частности искусственные нейронные сети. Но так как использование ИНС наиболее эффективно для больших массивов данных, в рамках данной статьи ограничимся применением статистических методов, в частности получением уравнений авторегрессии для каждого месяца года.

Рассмотрим построение прогнозных картин возникновения аварийных ситуаций и соответствующего этим отказам количества недоотпущенной потребителям ЭЭ по каждому месяцу года.

Пользуясь технологиями Excel, определим значение коэффициента R_t для каждого месяца года. С января по декабрь значения этого коэффициента для отказов равны соответственно: 0,999547; 0,999422; 0,99572; 0,998617; 0,999455; 0,998632; 0,992847; 0,999253; 0,999514; 0,998346; 0,997653 и 0,998174.

Для величин недоотпуска ЭЭ эти значения равны соответственно: 0,998704; 0,9947; 0,995274; 0,997614; 0,999514; 0,998848; 0,996077; 0,944569; 0,998657; 0,9972; 0,9977 и 0,996397.

Как видно, коэффициент автокорреляции имеет высокое значение, что свидетельствует о сильной внутрирядной связи массива данных. Следовательно, появляется возможность получения уравнений авторегрессии, позволяющих осуществить прогностическую оценку иссле-

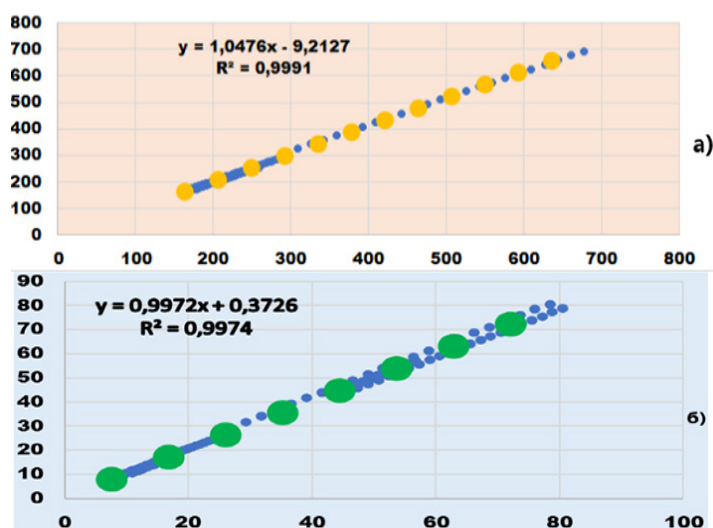


Рис. 3. Авторегрессионные модели и уравнения для получения прогнозных значений: а) аварийных отключений; б) величины недоотпуска

Fig.3. Autoregressive models and equations for obtaining forecast values: a) emergency shutdowns; b) undersupplied of electricity values

Таблица 3. Уравнения авторегрессии для событий отказов и величины недоотпуска ЭЭ по месяцам года
 Table 3. Autoregression equations for failure events and the amount of EE under-supplied by month of the year

Месяц года	Уравнения авторегрессии для количества отказов (конечное значение массива данных)	Уравнения авторегрессии для величины недоотпуска ЭЭ (конечное значение массива данных)
Январь	$y = 1,0476x - 9,2127$ $R^2 = 0,9991$ (224)	$y = 0,9972x + 0,3726$ $R^2 = 0,9974$ (7,573277)
Февраль	$y = 1,0385x - 9,0355$ $R^2 = 0,9988$ (289)	$y = 0,9896x + 0,6592$ $R^2 = 0,9894$ (8,021453846)
Март	$y = 0,9962x + 2,4848$ $R^2 = 0,9915$ (320)	$y = 0,9935x + 0,5712$ $R^2 = 0,9906$ (13,03209231)
Апрель	$y = 1,0236x - 8,6998$ $R^2 = 0,9972$ (415)	$y = 1,0067x - 0,1346$ $R^2 = 0,9952$ (32,23624615)
Май	$y = 1,0362x - 8,5976$ $R^2 = 0,9989$ (303)	$y = 0,9995x + 0,2195$ $R^2 = 0,999$ (9,110369231)
Июнь	$y = 1,017x - 2,9939$ $R^2 = 0,9973$ (293)	$y = 1,0139x - 0,0862$ $R^2 = 0,9977$ (11,6858)
Июль	$y = 1,0372x - 13,967$ $R^2 = 0,9857$ (402)	$y = 0,9952x + 0,3033$ $R^2 = 0,9922$ (26,06175385)
Август	$y = 1,0068x - 0,7157$ $R^2 = 0,9985$ (245)	$y = 0,9439x + 1,6546$ $R^2 = 0,8922$ (17,48713846)
Сентябрь	$y = 1,0284x - 6,2247$ $R^2 = 0,999$ (246)	$y = 1,0152x - 0,1513$ $R^2 = 0,9973$ (20,34403846)
Октябрь	$y = 0,9909x + 1,9693$ $R^2 = 0,9967$ (302)	$y = 1,0082x - 0,1035$ $R^2 = 0,9944$ (22,36926154)
Ноябрь	$y = 0,9955x + 1,1852$ $R^2 = 0,9953$ (312)	$y = 0,9283x + 1,257$ $R^2 = 0,9954$ (50,84472308)
Декабрь	$y = 1,0034x - 1,9331$ $R^2 = 0,9964$ (347)	$y = 1,0012x + 0,1046$ $R^2 = 0,9928$ (25,80579231)

двух показателей (отказов и величины недоотпуска ЭЭ). Для получения уравнений авторегрессии используем также возможности технологий Excel.

На рис. 3 представлены полученные диаграммы изменения авторегрессионных моделей, отражающие изменение трендов для событий отказов и величины недоотпуска ЭЭ для января месяца, соответственно. Аналогично были получены уравнения авторегрессии и для остальных месяцев года (табл. 3).

Пользуясь полученными уравнениями авторегрессии, определим прогнозные значения исследуемых показателей для соответствующих месяцев 2024 г. Для этого конечное значение каждого массива данных³ – «x» подставляем в соответствующее уравнение авторегрессии для каждого месяца. Для определения эффективности полученных прогнозных значений исследуемых показателей корректнее всего было бы использовать реальные данные по этим показателям за 2024 г. Но в опубликованных открытых данных пока такой информации нет. В связи с этим для примера в качестве критерия сравнения полученного прогнозного значения исследуемого показателя в 2024 г. будем использовать усредненное значение массива данных этого же показателя в исследуемом интервале лет наблюдений. Такой критерий более коррек-

³ Для каждого месяца года конечное значение массива данных исследуемого показателя представлено в скобках

Таблица 4. Значения показателей количества отказов и величины недоотпуска ЭЭ в исследуемых Сетях
 Table 4. The indicators values of the failures and the magnitude of the EE under-discharge numbers in the studied Networks

Месяц года	Усредненное значение массива данных количества отказов за 2015–2023 гг. (шт.)	Прогнозное значение количества отказов в 2024 г. (шт.)	Усредненное значение массива данных величины недоотпуска ЭЭ за 2015–2023 гг. (тыс. кВт·ч)	Прогнозное значение величины недоотпуска ЭЭ на 2024 г. (тыс. кВт·ч)
Январь	279	226	33,6475	7,92467
Февраль	301	291	38,4674	8,59723
Март	379	321	62,7747	13,51858
Апрель	421	407	29,3862	32,31763
Май	358	305	27,4265	9,32531
Июнь	248	295	28,4188	11,76203
Июль	392	403	47,3786	26,24
Август	298	246	29,1885	18,16071
Сентябрь	264	247	22,0510	20,50197
Октябрь	251	301	14,3392	22,44919
Ноябрь	288	312	19,3735	48,45616
Декабрь	394	346	33,5737	25,94136

тно использовать, поскольку последнее значение массива, соответствующее последнему году наблюдения (2023), уже использовалось для определения прогнозного значения. Данные расчетов представлены в табл. 4.

Визуализация полученных значений представлена на рис. 4.

Анализ табл. 3 и рис. 4 показывает, что полученные прогнозные значения по отказам в исследуемых Сетях гораздо более приближены к контрольным (усредненным) значениям (рис. 4а), чего не скажешь о тех же прогнозных значениях величины недоотпуска ЭЭ (рис. 4б). При этом и в том и в другом случае прогнозные значения меньше контрольных: по отказам –

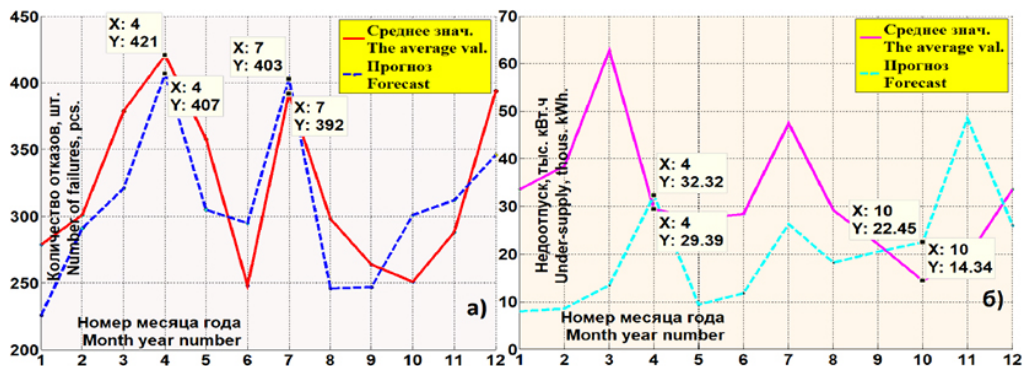


Рис. 4. Изменение прогнозных и контрольных значений исследуемых показателей: а) отказы; б) недоотпуск ЭЭ

Fig. 4. Changes in the forecast and control values of the studied indicators: a) failures; b) EE under-supply

в среднем на 4,6 %, по величине недоотпуска – на 36 %. Такое расхождение объясняется тем, что последние 2 года и количество отказов, и величина недоотпуска были значительно меньше предыдущих лет. Так или иначе, качество прогноза может быть подтверждено реальными данными по исследуемым показателям, которые будут опубликованы по итогам 2024 г. в открытом доступе.

Заключение. На основании произведенного анализа, учитывая полученные результаты, можно сформулировать следующие выводы.

1. Оборудование СРС находится в наиболее работоспособном состоянии по сравнению с другими филиалами ПАО «Россети Волги». Количественный состав оборудования исследуемых электрических сетей, превысившего нормативный срок эксплуатации, достигает в среднем 23,5 %, что более чем в три раза меньше по сравнению с другими филиалами этого ПАО.

2. Из общего количества отказов за исследуемый период (20194 шт.) наибольшее количество произошло в 2018 г. (28 %), наименьшее – в 2021 г. (16 %). При этом общий объем недопоставленной электроэнергии за период обследования превысил 1867 тыс. кВт·ч.

3. Наиболее характерной группой причин возникновения аварийных ситуаций в исследуемых электрических сетях являются причины, связанные с воздействием посторонних лиц и организаций, не участвующих в технологическом процессе. На их долю приходится до 30 % всех отказов. Таким образом, уровень изношенности электросетевого оборудования СРС не особо влияет на аварийность в этих сетях, что свидетельствует о значительном внимании руководства компании к разработке и реализации комплекса противоаварийных мероприятий.

4. На основании данных численного анализа по событиям возникновения аварийных отключений в исследуемых электрических Сетях произведена превентивная оценка возможности появления событий отказа и соответствующего им недоотпуска электрической энергии по месяцам 2024 г.

Список литературы / References

[1] Репетюк С. В. *Экспертно-аналитическая записка по теме: «Электросетевой комплекс Российской Федерации: анализ состояния и организационная структура»*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://em.ranepa.ru/files/docs/research/2020_133_ex_sum_1.pdf (дата обращения: 08.02.2024). [Repetyuk S. V. *Expert and analytical note on the topic: “The electric grid complex of the Russian Federation: analysis of the state and organizational structure”*. [Electronic resource]. Access mode: https://em.ranepa.ru/files/docs/research/2020_133_ex_sum_1.pdf (date of application: 02.08.2024) (in Rus.)].

[2] *Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2021–2027 годы. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации № 88 от 26 февраля 2021 г.* [Электронный ресурс]. – Режим допуска: <https://www.rosseti-sib.ru/potrebitelyam/territory/obshchie-dannye-po-pokazatelyam-avariynosti-v-setyakh-do-1-kv/> (дата обращения: 08.02.2024). [On approval of the scheme and program for the development of the Unified Energy System of Russia for 2021–2027. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 88 dated February 26, 2021 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.rosseti-sib.ru/potrebitelyam/territory/obshchie-dannye-po-pokazatelyam-avariynosti-v-setyakh-do-1-kv/>

potrebityam/territory/obshchie-dannye-po-pokazatelyam-avariynosti-v-setyakh-do-1-kv – (accessed 08.02.2024). (in Rus.)].

[3] Белов С. И., Петров П. С. Прогнозирование аварийных отключений в электрических сетях 35–220 кВ, *Вестник МГАУ имени В. П. Горячкина*, 2017, 80(4), 77–82. [Belov S. I., Petrov P. S. Forecasting of emergency shutdowns in electric networks of 35–220 kV, *Bulletin of MGAU named after V. P. Goryachkin*, 2017, 80(4), 77–82 (in Rus.)].

[4] Галиаскаров И. М., Мисриханов М. Ш., Рябченко В. Н., Шунтов А. В. Применение нейронных сетей для прогнозирования аварийности воздушных линий. *Электротехника. Передача и распределение*, 2020, 6(63), 68–74. [Galiaskarov I. M., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N., Shuntov A. V. The use of neural networks for predicting the accident rate of overhead lines. *Electricity. Transmission and Distribution*, 2020, 6(63), 68–74 (in Rus.)].

[5] Галиаскаров И. М., Мисриханов М. Ш., Рябченко В. Н., Шунтов А. В. О прогнозировании аварийности воздушных линий основной сети энергосистем. *Электричество*, 2020, 6(63), 6–12 [Galiaskarov I. M., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N., Shuntov A. V. On predicting the accident rate of overhead lines of the main grid of power systems. *Electricity*, 2020, 6(63), 6–12 (in Rus.)].

[6] Медведева М. Л., Кузьмин С. В., Кузьмин И. С., Шманев В. Д. Анализ и прогноз аварийности распределительных сетей и электроприемников 6–10 кВ в горной отрасли. *Надежность и безопасность энергетики*, 2017. 10(2), 120–125. DOI: 10.24223/1999–5555–2017–10–2–120–125 [Medvedeva M. L., Kuzmin S. V., Kuzmin I. S., Shmanev V. D. Analysis and forecast of accidents of distribution networks and 6–10 kV electric receivers in the mining industry. *Reliability and Safety of Energy*, 2017. 10(2), 120–125. DOI: 10.24223/1999–5555–2017–10–2–120–125 (in Rus.)].

[7] Клименко В. В., Кондратьева О. Е., Локтионов О. А., Федотова Е. В. Влияние меняющихся ветровых нагрузок на надежность воздушных линий электропередачи в различных регионах России. *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*, 2022, 504(1), 58–65. [Klimenko V. V., Kondratieva O. E., Loktionov O. A., Fedotova E. V. The influence of changing wind loads on the reliability of overhead power transmission lines in various regions of Russia. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences*, 2022, 504(1), 58–65. (in Rus.)]

[8] Дементьев С. С. Интеллектуальная система мониторинга гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи. *Дисс. ... канд. техн. наук*, 2019. Волгоград. 142. [Dementiev S. S. An intelligent system for monitoring ice formation on overhead power lines. *Diss. on the job. learned. step. Candidate of Technical Sciences*, 2019. Volgograd. 142. (in Rus.)].

[9] Белов С. И. Петров П. С. Прогнозирование внезапных отключений в электрических сетях 35–220 кВ на ближайший год. *Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации*, 2018, 1 [Belov S. I. Petrov P. S. Forecasting of sudden outages in electric networks of 35–220 kV for the next year. *Operational Management in the electric power industry: training of personnel and maintaining their qualifications*, 2018, 1 (in Rus.)].

[10] Галиаскаров И. М. Прогнозирование аварийности воздушных линий основной сети энергосистем: автореф. дисс. ... канд. техн. наук.: 05.14.02, Москва. 2021 г. [Galiaskarov I. M. Forecasting the accident rate of overhead lines of the main network of power systems: abstract. diss. for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.14.02, Moscow. 2021 (in Rus.)].

[11] Наумов И. В., Карпова Е. В. Анализ причин повреждаемости распределительных электрических сетей 10 кВ (На примере Южных электрических сетей г. Иркутска). *Надежность*

и безопасность энергетики, 2018, 4(11), 299–304 [Naumov I. V., Karpova E. V. Analysis of the causes of damage to 10 kV distribution electric networks (On the example of the Southern electric networks of Irkutsk). *Reliability and Safety of Energy*, 2018, 4(11), 299–304 (in Rus.)].

[12] Naumov I. V., Karpova E. V., Karamov D. N. Reliability level research in distribution electrical networks of Irkutsk. *E 3SWeb of Conferences 114, 03005(2019)/ Energy Systems Research*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20191140201> E 3S 114, 1–4.

[13] Наумов И. В., Карамов Д. Н. К вопросу о повреждаемости воздушных линий электропередачи в системах электроснабжения. *Надежность и безопасность энергетики*, 2021, 2(14), 84–91. [Naumov I. V., Karamov D. N. On the issue of damage to overhead power lines in power supply systems. *Reliability and Safety of Energy*, 2021, 2(14), 84–91(in Rus.)].

[14] Наумов И. В. Анализ работы электрических сетей «Облкоммунэнерго» Иркутской области. *Надежность и безопасность энергетики*, 2021, 3(14), 100–110 [Naumov I. V. Analysis of the operation of the electric networks of Oblkommunenergo in the Irkutsk region. *Reliability and Safety of Energy*, 2021, 3(14), 100–110 (in Rus.)].

[15] Наумов И. В. О функционировании филиала МРСК «Сибири» ПАО Россети АО «Читаэнергообьт». *Надёжность и безопасность энергетики*, 2022, 4(15). 231–239 [Naumov I. V. On the functioning of the IDGC of Siberia branch of PJSC Rosseti JSC Chitaenergobyt. *Reliability and safety of energy*, 2022, 4(15). 231–239 (in Rus.)].

[16] Наумов И. В. Вопросы надежности транспорта электрической энергии (на примере компании ПАО «Красноярскэнергообьт»). *Надежность и безопасность энергетики*, 2023, 1(16), 15–26 [Naumov I. V. Issues of reliability of electric energy transport (on the example of the company PJSC “Krasnoyarsk Energobyt”). *Reliability and Safety of Energy*, 2023, 1(16), 15–26 (in Rus.)].

[17] Бильгаева Л. П., Власов К. Г. Исследование моделей нейросетевого прогнозирования в среде Matlab. *Приложение математики в экономических и технических исследованиях*, 2017; 1(7), 11–19 [Bilgaeva L. P., Vlasov K. G. Investigation of neural network forecasting models in the Matlab environment. *Application of Mathematics in Economic and Technical Research*, 2017; 1(7), 11–19 (in Rus.)].

[18] Данилов А. М., Гарькина И. А. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем: монография. Пенза: ПГУАС, 2014. 168 [Danilov A. M., Garkina I. A. Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems: monograph. Penza: PGUAS, 2014. 168 (in Rus.)].

[19] Щербатов И. А. Применение искусственных нейронных сетей при управлении энергетическим оборудованием. Часть 2. Прогнозирование значений параметров, дефектов, отказов и технического состояния. *Новое в российской электроэнергетике*, 2020, 10, 37–46 [Shcherbatov I. A. The use of artificial neural networks in the management of energy equipment. Part 2. Prediction of parameter values, defects, failures and technical condition. *New in the Russian Electric Power Industry*, 2020, 10, 37–46 (in Rus.)].

[20] Клычев В. Е. Применение нелинейных авторегрессионных моделей нейронных сетей для прогнозирования экономических показателей. *Ученые записки Тамбовского отделения РОСМУ*, 2016, 5, 133–136 [Klychev V. E. Application of nonlinear autoregressive models of neural networks for forecasting economic indicators. *Scientific Notes of the Tambov Branch of ROSMU*, 2016, 5, 133–136 (in Rus.)].

[21] *Филиал Публичного акционерного общества «Россети Волга» – «Саратовские распределительные сети»*. Режим доступа: https://b2b.house/company/FILIAL-PUBLICHNOGO-AKCIONERNOGO-OBSHHESTVA-ROSSETI-VOLGA-SARATOVSKIE-RASPREDELITELNYE-SETI_0166bef0-1b94-4741-ad51-7c626e3d89d6/ (дата обращения: 09.01.2024) [A branch of the Public Joint Stock Company Rosseti Volga is Saratov Distribution Networks. Access mode: https://b2b.house/company/FILIAL-PUBLICHNOGO-AKCIONERNOGO-OBSHHESTVA-ROSSETI-VOLGA-SARATOVSKIE-RASPREDELITELNYE-SETI_0166bef0-1b94-4741-ad51-7c626e3d89d6/ (date of request: 09.01.2024) (in Rus.)].

[22] *Филиал ПАО «Россети Волга» – «Саратовские распределительные сети»*. Режим доступа: https://web.archive.org/web/20210506202917/http://www.rossetivolga.ru/ru/o_kompanii/filiali/filial_oao_mrsk_volgi_saratovskie_raspredelitelnie_seti/ (дата обращения: 09.01.2024) [The branch of PJSC Rosseti Volga is Saratov Distribution Networks. Access mode: https://web.archive.org/web/20210506202917/http://www.rossetivolga.ru/ru/o_kompanii/filiali/filial_oao_mrsk_volgi_saratovskie_raspredelitelnie_seti/ (date of request: 09.01.2024) (in Rus.)].

[23] *Годовой отчёт публичного акционерного общества «Россети Волга» за 2022 г.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rossetivolga.ru/i/files/2023/7/4/go_osseti_volga_2022.pdf (дата обращения: 09.02.2024) [Annual report of the Public Joint Stock Company Rosseti Volga for 2022 [Electronic resource]. Access mode: https://www.rossetivolga.ru/i/files/2023/7/4/go_osseti_volga_2022.pdf (date of application: 02.09.2024) (in Rus.)].

[24] *Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2024–2029 годы. Саратовская область*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/future_plan/public_discussion/support_materials/2023/61_Saratovskaja_oblast.pdf (дата обращения: 09.02.2024) [The scheme and program for the development of electric power systems in Russia for 2024–2029. Saratov region. [Electronic resource]. Access mode: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/future_plan/public_discussion/support_materials/2023/61_Saratovskaja_oblast.pdf (date of application: 02.09.2024) (in Rus.)].

[25] *Энергетика Саратовской области*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A...> (дата обращения: 09.02.2024) [Power engineering of the Saratov region. [electronic resource]. Access mode: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A...> (date of application: 02.09.2024) (in Rus.)].

[26] *Саратовская область в цифрах*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://64.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/karman%202022.pdf>. (дата обращения: 10.02.2024) [Saratov region in numbers. [Electronic resource]. Access mode: <https://64.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/karman%202022.pdf>. (date of application: 02.10.2024) (in Rus.)].

[27] *Сборник типовых технических решений ПАО «Россети». СТО 34.01–2.2–032–2017. Линейное коммутационное оборудование 6–35 кВ – секционирующие пункты (реклоузлы). Том 1.1 «Общие данные». Стандарт организации. Дата введения 14.11.2017*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293730/4293730252.pdf>. (дата обращения: 11.02.2024) [Collection of standard technical solutions of PJSC ROSSETI. ONE HUNDRED 34.01–2.2–032–2017. 6–35 kV linear switching equipment – sectioning points (recluses). Volume 1.1 “General data”. The standard of the organization. The date of introduction is 14.11.2017. [Electronic resource]. Admission mode: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293730/4293730252.pdf>. (date of application: 02.11.2024) (in Rus.)].

[28] Richard J. Campbell. Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency. Congressional Research Service 7–5700 www.crs.gov R 42696. 2012. 18 p. [Electronic resource]. Admission mode: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1707619250&tld=ru&lang=en&name=R_42696.pdf&text=3.%20Galvin%20Electricity.. (date of application: 11.02.2024).

[29] *Годовой отчет ПАО Россети за 2020 г.* [Электронный ресурс]. Режим допуска: https://www.rosseti.ru/investors/common/results/doc/Pril2_2021.pdf. (дата обращения 11.02.2024) [*Annual report of PJSC ROSSETI for 2020* [Electronic resource]. Admission mode: https://www.rosseti.ru/investors/common/results/doc/Pril2_2021.pdf. (accessed 02.11.2024) (in Rus.)].

[30] *Открытый журнал. «Иркутскэнерго». Региональная энергетическая вертикально интегрированная компания. 18 сентября 2020 г.* [Электронный ресурс]. Режим допуска: <https://journal.open-broker.ru/visit-card/pao-irkutskenergo>. Дата обращения 04.01.2022 [An open journal. Irkutskenergo. A regional vertically integrated energy company. September 18, 2020 [Electronic resource]. Admission mode: <https://journal.open-broker.ru/visit-card/pao-irkutskenergo>. (date of application 04.01.2022 (in Rus.)].

[31] Кугучева Д.К., Харитонов М.С. Оценка эффективности автоматического секционирования участка распределительной сети на примере Калининградской области. *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*, 2022. 5(92), 8–31 [Kugucheva D.K., Kharitonov M. S. Evaluation of the effectiveness of automatic partitioning of a section of a distribution network on the example of the Kaliningrad region. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*, 2022. 5(92), 8–31 (in Rus.)].

[32] *Годовой отчет ПАО Россети за 2021 г.* [Электронный ресурс]. Режим допуска: https://www.rossetivolga.ru/i/files/2022/6/17/godovoy_otchet_osseti_volga_2021.pdf. (дата обращения 11.02.2024) [*Annual report of PJSC ROSSETI for 2021* [Electronic resource]. Admission mode: https://www.rossetivolga.ru/i/files/2022/6/17/godovoy_otchet_osseti_volga_2021.pdf. (accessed 02.11.2024) (in Rus.)].

[33] *ЭнергоНьюс. Проблема старения электросетевого комплекса России.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://energo-news.ru/archives/161370> (дата обращения: 11.02.2024) [*EnergoNews. The problem of aging of the Russian electric grid complex.* [Electronic resource]. Access mode: <https://energo-news.ru/archives/161370> (date of application: 02.11.2024) (in Rus.)].