

3. Kosoukhov, F. D. Snizhenie poter moshchnosti ot nesinusoidalnykh tokov v selskikh elektricheskikh setyakh 0,38 kV / F. D. Kosoukhov, N. V. Vasilev, A. O. Gorbunov. – DOI 10.24411/2078-1318-2019-12125. – Tekst: elektronnyy // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 2 (55). – С. 125-135.

4. Kosoukhov, F. D. Novye nauchnye napravleniya v energosberezhении v trekhfaznykh transformatorakh i chetyrekhprovodnykh liniyakh pri nesimmetrichnoy, nelineynoy i reaktivnoy nagruzkakh / F. D. Kosoukhov, N. V. Vasilev, E. S. Kuznetsova. – Tekst: neposredstvennyy // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 2 (47). – С. 300-309.

5. GOST 32144-2013 Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Mezhdgosudarstvennyy standart. – Moskva: Standartinform, 2014. – 19 s. – Tekst: neposredstvennyy.

6. Fortescue, C. L. (1918). Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks. *AIEE Trans. Part II. Vol. 37:* 1027-1140.

7. Gorbunov, A. O. Issledovanie poter moshchnosti ot nesinusoidalnykh tokov v selskikh elektricheskikh setyakh 0,38 kV / A. O. Gorbunov. – Tekst: elektronnyy // AgroEkoInfo: Elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal. – 2019. – No. 2. – URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/2/st_236.doc.



УДК 621.311

И.В. Наумов, М.Н. Полковская
I.V. Naumov, M.N. Polkovskaya

АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОБЛКОММУНЭНЕРГО ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ В 2019 ГОДУ

THE ANALYSIS OF THE OPERATION OF ELECTRIC NETWORKS OF THE OBLKOMMUNENERGO OF THE IRKUTSK REGION IN 2019

Ключевые слова: отказы, время перерыва электроснабжения, недоотпуск электроэнергии, старение и износ оборудования.

Дан анализ работы электрических распределительных сетей десяти филиалов Облкоммунэнерго Иркутской области в 2019 г. В качестве примера рассмотрены причины аварийных отключений в странах ЕС и России. При исследовании использованы месячные данные об отказах оборудования на электрических сетях и их последствиях по 10 филиалам Облкоммунэнерго за 2019 г. Составлены алгоритмы и компьютерная программа для графического редактора Matlab, с помощью которых построены временные диаграммы изменения количества отказов, времени перерывов и величины недоотпуска электроэнергии для каждого месяца года. Помимо этого выявлены причины аварийных отключений, основными из которых являются нарушения в сетях потребителей, повреждение изоляторов, проводов, разрядников, опор воздушных линий электропередачи; ветровая нагрузка, снег, гололед, перекрытие изоляции и другие. Наибольшее число повреждений зафиксировано в Ангарском, Иркутском, Нижне-Удинском и Саянском филиалах. Кроме того, определены месяцы года, в которых происходит наиболее высокая повреждаемость и ее причины. В

частности, в июле большое число аварий было связано с влиянием природно-климатических факторов: сильного ветра, ливней, наводнений. Причинами аварий, связанных с природным воздействием, стали: падение деревьев, разрушение изоляторов, короткие замыкания, в том числе на подключенных к сетям областного предприятия частных линиях, а также аварии на сетях компаний-партнёров, от которых Облкоммунэнерго получает электроэнергию в свои сети. Рассмотрен износ электрических сетей, а также выполнение плана ремонта основного оборудования. Проанализирован уровень надежности по установленным показателям, рассмотрены основные причины отказа оборудования. Представлены характеристики по совершенствованию функционирования рассматриваемых электрических сетей.

Keywords: failures, power supply interruption time, power undersupply, equipment aging and wear.

The paper deals with the analysis of the operation of electric distribution networks of ten branches of the company Oblkommunenergo of the Irkutsk Region in 2019. As an example, the reasons for emergency shutdowns in the EU and Russia are considered. The study used monthly data on equipment failures on electric networks and their

consequences for ten branches of the Oblkommunenergo in 2019. The algorithms and a computer program for the Matlab graphics editor were compiled; with their help the time diagrams of changes in the number of failures, the time of interruptions and the amount of electricity underutilization for each month of the year were constructed. In addition, the causes of emergency outages were identified, the main were violations in consumer networks, damage to insulators, wires, arresters, supports of overhead power lines; wind load, snow, ice, insulation overlap, etc. The largest number of damages was recorded in the Angarsk, Irkutsk, Nizhne-Uda and Sayan branches of the company. In addition, the months of the year when the highest damage occurred and its causes were determined. In particular,

in July, a large number of accidents were associated with the influence of natural and climatic factors: strong winds, heavy rains, and floods. The causes of accidents related to the natural impact were falling trees, destruction of insulators, short circuits, including on private lines connected to the networks of the regional enterprise, as well as accidents on the networks of partner companies from which the Oblkommunenergo receives electricity to its networks. The wear of electrical networks, as well as the implementation of the repair plan for the main equipment was considered. The level of reliability according to the established indicators was analyzed, the main causes of equipment failure were considered. The characteristics of improving the functioning of the considered electrical networks are presented.

Наумов Игорь Владимирович, д.т.н., профессор, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: professorsnaumov@list.ru.

Полковская Марина Николаевна, к.т.н., доцент, Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, п. Молодежный, Российская Федерация, e-mail: polk_mn@mail.ru.

Naumov Igor Vladimirovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: professorsnaumov@list.ru.

Polkovskaya Marina Nikolayevna, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Yezhevskiy, Irkutsk Region, Russian Federation, e-mail: polk_mn@mail.ru.

Введение

На современном этапе развития производства и других направлений жизнедеятельности человека большую значимость приобретает система электроснабжения. Перебои в электроснабжении приводят к различным последствиям во всех сферах экономики: промышленности, сельском и лесном хозяйстве, строительстве, транспорте, торговле, здравоохранении и др. В связи с этим актуален анализ работы электрических сетей, отказов оборудования и их последствий [1-4]. Следует отметить, что функционирование объектов электросетевого комплекса зависит от различных факторов: эксплуатационных, природно-климатических, внешних и прочих [5-9].

Цель работы – анализ работы электрических сетей Облкоммунэнерго Иркутской области.

Областное государственное энергетическое предприятие «Энергоснабжающая компания по эксплуатации электрических сетей «Облкоммунэнерго» (ОКЭ) представляет собой сетевую организацию, обеспечивающую эксплуатацию и ремонт электросетевого хозяйства на территории Иркутской области. Ежегодно каждый филиал ОКЭ предоставляет отчетность о работе своего подразделения по следующим вопросам: баланс электрической энергии (отпуск электроэнергии в сеть и ее отпуск из сети), информацию об объектах электросетевого хозяйства, износ основных фондов, выполнение плана ремонта

основных фондов, фактические и плановые значения показателей надежности и качества услуг на каждый расчетный период регулирования в пределах долгосрочного периода регулирования, а также сведения об отказах электроснабжения и их последствиях.

Результаты и обсуждение

На конец 2019 г. структура электрических сетей всех филиалов ОКЭ включала следующие элементы [10]. Воздушные ЛЭП – всего 9494,359 км (увеличение к 2018 г. составило 25,23%), в том числе: ВН – 158,66 км (осталось на прежнем уровне); СН – 2334,18 км (увеличились на 38%); НН – 6116,03 км (увеличение к 2018 г. составило 20,2%). Кабельные линии – всего 1942,86 км (увеличение на 1,73%), в т.ч. ВН – нет; СН – 916,46; 916,07 км (протяженность увеличилась на 0,39 км); НН – 1026,4 км (уменьшилось на 310 м). Трансформаторные подстанции 6-10 кВ – 1573,527 МВА (увеличение на 0,95%); 35 кВ – 238,06 МВА (уменьшилось на 0,6%); 110 кВ – 13,1 МВА (уменьшение на 32,5%). К сетям «Облкоммунэнерго» подключено более 390 тыс. потребителей как физических, так и юридических лиц, в том числе бюджетных организаций. Отпуск электроэнергии в сеть на конец 2019 г. составил 3976624,536 кВт·ч (уменьшение к 2018 г. 0,3%), в том числе по сетям ВН – 1808882,243 кВт·ч (уменьшение на 8,7%); СН – 2166877,028 кВт·ч (увеличение на

8,1%); НН – 865,265 кВт·ч (уменьшение на 41,56%). Отпуск электроэнергии из сети всего – 3251814,123 кВт·ч. (увеличение на 1,54%), из них: ВН – 23377,025 кВт·ч (уменьшение на 19,46%); СН – 887127,923 кВт·ч (увеличение на 7,65%); НН – 2341309,175 кВт·ч (уменьшение на 0,34%). Потери электроэнергии всего составили 724810,413 кВт·ч (уменьшились на 7,74%), в том числе по электрическим сетям: ВН – 40070,232 кВт·ч (уменьшение на 11,44%); СН – 355746,27 кВт·ч (снижение на 10,62%); НН – 328993,911 кВт·ч (снижение на 4%).

По данным [11] в России средний возраст оборудования электрических сетей составляет 34 года, а возраст 30% этого оборудования достигает 45 лет. Даже несмотря на то, что аварийные отказы удалось за последние 5 лет снизить на 20% за счет обновления сетевой инфраструктуры, по итогам 2019 г. удельная аварийность электрических сетей снизилась еще на 12%, проблема старения оборудования по-прежнему стоит очень остро.

Согласно исходной информации, в 2019 г. планировалось отремонтировать: 3,25 км 35 кВ. По факту на конец 2019 г. отремонтировано 8,71 км (план ремонта превышен в 2,68 раза). План ремонта ВЛ 6-10 кВ составлял 28,3 км. На конец 2019 г. отремонтировано 8,09 км. Не отремонтированными осталось 20,21 км (71,4%). Для ВЛЭП план – 116,02 км, отремонтировано 40,143 км (недовыполнение 65,4%). Для кабельных ЛЭП отремонтировать планировалось 0,445 км, по факту отремонтировано 2,57 км (перевыполнение в 5,78 раза). По КЛ 0,38 кВ план составлял 0,54 км, фактически план не выполнен. В то же время ремонт трансформаторных подстанций 6-10/0,4 не планировался, но по итогам 2019 г. отремонтировано 11 ТП.

При этом износ всех ВЛЭП составил 86,7% (снижение к 2018 г. 0,35%); износ оборудования ТП – 82,4% (увеличился на 1,4%). Следует иметь в виду, что результаты по износу оборудования в значительной степени отличаются от старения. Старение – это постепенное снижение физико-химических свойств объекта без учета влияния режима его работы. При износе же режим работы оборудования имеет непосредственное значение на снижение его свойств до достижения предельного состояния.

В большинстве стран для оценки уровня надежности электроснабжения Международным институтом инженеров по электротехнике и

электронике (IEEE) устанавливаются специальные индексы, характеризующие связь между количеством (продолжительностью) возникших отказов и количеством потребителей, подключенных к шинам центров питания (SAIFI – средний индекс частоты прерывания системы; SAIDI – показатель средней продолжительности прекращения передачи электрической энергии; CAIDI – индекс средней продолжительности прерывания потребителя; STAIIDI – индекс общей средней продолжительности прерывания работы потребителя; CAIFI – средний индекс частоты прерываний потребителей; ASAI – средний индекс доступности услуг. Следует отметить, что в г. Минске за 2019 г. SAIFI составил 0,5635, SAIDI – 0,5271). По оценкам экспертов, среднее значение этого показателя для ряда европейских стран колеблется от 0,2 до 4,35. Например, индекс надежности энергосистем в следующих странах имеет средние значения: Австрия – 0,73; Великобритания – 0,53; Германия – 0,51; Норвегия – 1,59; Финляндия – 1,42 [12, 13].

В соответствии с Приказом Министерства энергетики РФ от 29 ноября 2016 г. № 1256 «Об утверждении Методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций» [14] показатель средней продолжительности прекращения передачи электрической энергии в каждом расчетном периоде регулирования в пределах долгосрочного периода регулирования (Pn) определяется по формуле:

$$Pn = Tnp / Nmn,$$

где Tnp – фактическая суммарная продолжительность всех прекращений передачи электрической энергии в отношении потребителей услуг сетевой организации за расчетный период регулирования, ч;

Nmn – максимальное за расчетный период регулирования число точек присоединения потребителей услуг сетевой организации к электрической сети сетевой организации, шт.

Для электрических сетей ОКЭ по плану на 2019 г. показатель Pn должен был составлять 0,0063. К сожалению, данные по этому показателю на конец 2019 г. отсутствуют. Вместе с этим значение этого показателя за период 2014-2018 гг. менялось – соответственно 0,0068;

0,0085; 0,0085; 0,0055 и 0,0031. И если в 2018 г. этот показатель (по сравнению с планом) уменьшился более чем в 2 раза, к концу 2019 г. следует ожидать аналогичной картины.

В соответствии с полученной информацией по отказам и их последствиям составлены алгоритм и программа для графического редактора Matlab, в соответствии с которыми получены диаграммы изменения количества отказов по месяцам года (рис. 1), времени перерывов электроснабжения (рис. 2) и величины недоотпуска электроэнергии в сетях филиалов ОКЭ (рис. 3).

Кроме того, построены временные диаграммы общего количества отказов и их последствий за 2019 г. (рис. 4).

Информация по функционированию рассматриваемых электрических сетей получена из годовых отчетов ОКЭ [10].

На рисунках 1-3 по оси X представлены цифровые обозначения филиалов электрических сетей ОКЭ: 1 – Ангарский, 2 – Черемховский, 3 – Саянский, 4 – Нижне-Удинский, 5 – Тайшетский, 6 – Усть-Кутский, 7 – Киренский, 8 – Мамско-Чуйский, 9 – Усть-Ордынский, 10 – Иркутский.

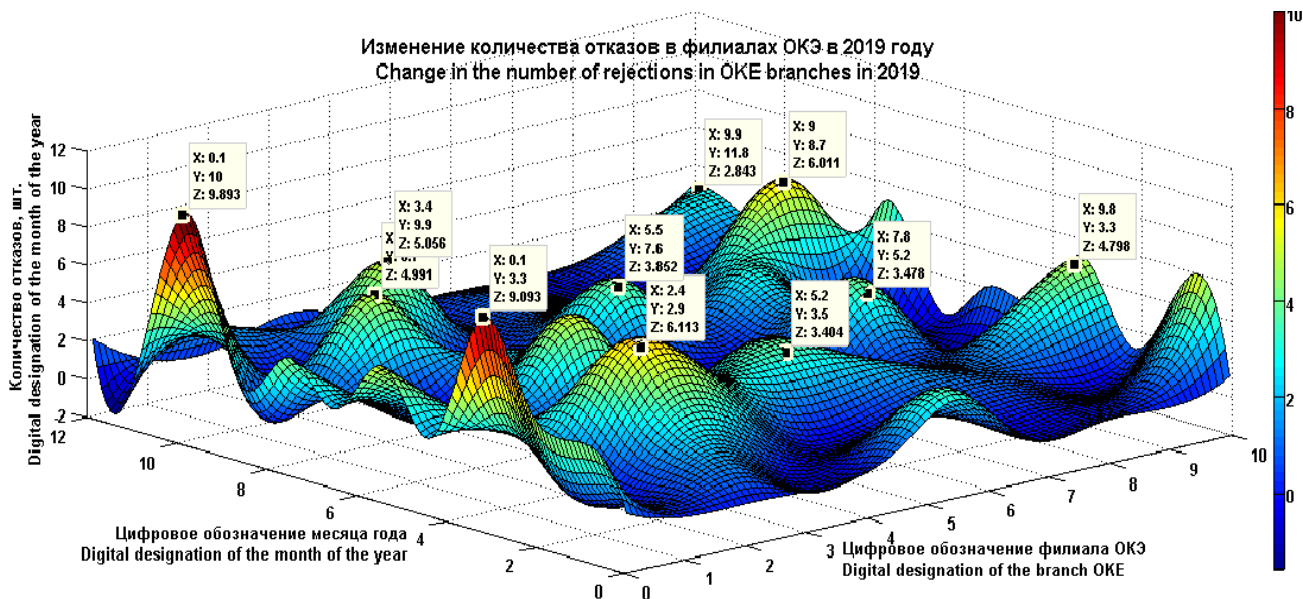


Рис. 1. Временная диаграмма изменения количества отказов по филиалам ОКЭ в 2019 г.

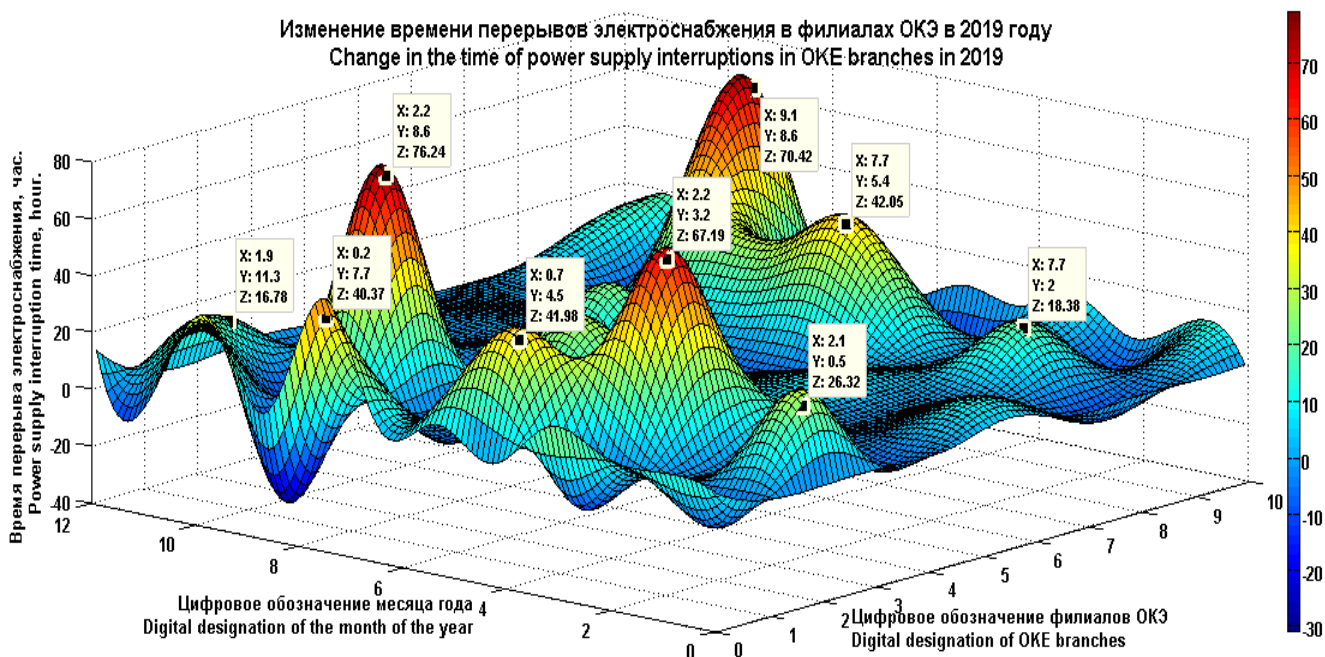


Рис. 2. Временная диаграмма изменения времени перерыва электроснабжения в электрических сетях филиалов ОКЭ в 2019 г.

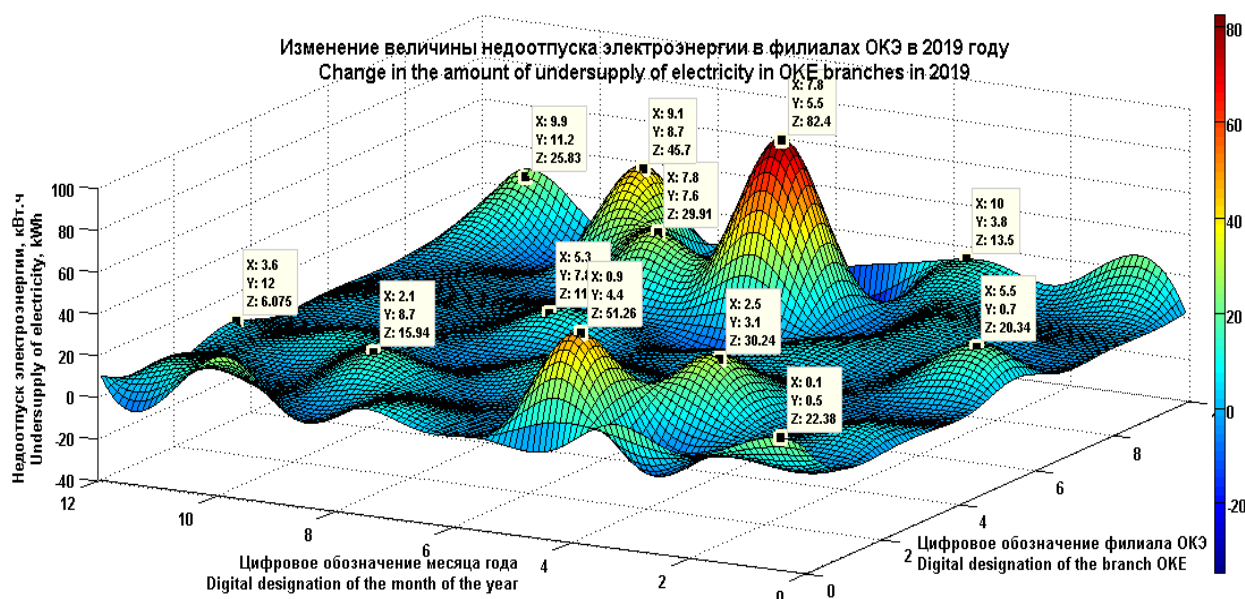


Рис. 3. Временная диаграмма изменения величины недоотпуска электрической энергии в сетях филиалов ОКЭ в 2019 г.

Анализ представленных временных диаграмм (рис. 1-3) показал следующее. Общее количество отключений по 10 филиалам составило 192, что на 4,35% больше, чем количество отключений в 2018 г. (184). Наиболее повреждаемыми являются электрические сети Ангарского филиала (48). На их долю приходится 25% всех отключений, причем наибольшее количество отказов в апреле и октябре (соответственно, 18,75 и 20,83% от всех отключений в этом филиале). При этом общее время перерыва электроснабжения в Ангарском филиале сетей за год составило около 170 ч, а недоотпуск – 108510 кВт·ч. Другими филиалами ОКЭ, электрические сети которых наиболее подвержены повреждениям, являются сети Саянского (23 отказа), Нижне-Удинского (26) и Иркутского филиалов (26). Суммарно на долю этих филиалов приходится 39% всех отключений, общей продолжительностью 368,94 ч. Общая величина недоотпуска на сети Ангарского, Усть-Ордынского и Иркутского филиалов составила 231400 кВт·ч (68,5%). Наименее повреждаемыми являются электрические сети Киренского филиала ОКЭ. За 12 мес. 2019 г. в них произошло только 4 отказа продолжительностью 9,45 ч, за которые произошел недоотпуск 10330 кВт·ч электроэнергии. Всего общему количеству (192) отказов по электрическим сетям 10 филиалов (перерыв составил 977,42 ч) соответствует недоотпуск 717990 кВт·ч электроэнергии (что меньше на 343460 кВт·ч, по сравнению с 2018 г.). При средней стоимости электроэнер-

гии в 2019 г. 1,11 руб. для городского населения (для сельского населения 0,777 руб.) за 1 кВт·ч [15] общий ущерб от недоотпуска составил 796969 руб. Причины отказов весьма разнообразны. Как правило, в журналах регистрации отказов ВЛЭП фиксируются следующие повреждения: нарушения в сетях потребителей, повреждение изоляторов, повреждение проводов, разрядников, опор ВЛЭП; ветровая нагрузка, снег, гололед, перекрытие изоляции и другие.

Наибольшее количество отключений в странах ЕС происходит по причинам повреждения оборудования (26,5% от общего числа повреждений) и повреждения в сетях потребителей (16,5%). В частности, в Финляндии при повреждении ЛЭП этого класса напряжения основными причинами являются: снеговая нагрузка (35%), падение деревьев (27%), перенапряжение (6%). В Северной Америке на долю повреждений при «неблагоприятной погоде» (дождь, снег, лед) приходится до 60%, падение деревьев – 19, неисправность оборудования – 14, молниевые разряды – 9, по неустановленным причинам – 17%. В штате Массачусетс отказы, вызванные влиянием на ЛЭП деревьев, распределились таким образом: 63% от сломанных ветвей (которые, падая на провода ЛЭП, приводят к замыканиям), 11% от упавших деревьев, 2% от разрастания деревьев [16].

В России отключения в сетях этого класса напряжения обусловлены следующими причинами: повреждение в сетях потребителя – около 11%, обрыв провода – до 42, повреждение

предохранителей – 6, повреждение коммутационной аппаратуры – более 7% [17]. Ситуация с отказами в ЛЭП также во многом зависит от климатических особенностей территорий, по которым трассируются эти ВЛЭП. Информация по соответствующим показателям надежности для воздушных линий электропередачи 6-10 кВ России, которые являются самыми протяженными, и в основном самыми повреждаемыми, очень различна. Это связано с территориальными и климатическими особенностями регионов, по которым эти ЛЭП проходят. В [18] утверждается, что 54,0% всех отключений связано с динамическим поведением проводов при воздействии ветровых и гололедно-изморозевых нагрузок. Эти отключения вызваны одним из следующих повреждений: обрыв провода (24,9%) или проволочной вязки провода к изолятору (9,8%), пережоги проволок проводов при их опасных сближениях и схлестывании (17%), срыв изолятора с крюка или штыря (2,3%). Критическое состояние имеет физический износ более 0,75. При этом эксплуатация таких ВЛЭП недопустима. Требуется срочное воздействие на оборудование.

Непосредственно в рассматриваемых электрических сетях всех филиалов причины повреждений также многообразны. Проведенный в июле 2019 г. анализ причин повреждений показал, что всего за этот месяц произошло 7 отказов: 1 отказ – в 17:30 ч (по Иркутскому времени) 30 мая и продолжался до 18:50 ч 1 июня общей продолжительностью 26 ч. Отказ произошел из-

за аварийного отключения ВЛ-35кВ «Слюдянка-Луговский» в результате обрыва ЛЭП, без централизованного электроснабжения были поселки Луговский, Согдиондон. Недоотпуск электроэнергии составил 7,5 тыс. кВт·ч, а материальный ущерб – 9 тыс. руб. Второй крупный отказ произошел в 11:20 ч 3 июня и продолжался до 24:00 ч 30 июня. Перерыв электроснабжения длился 648 ч из-за аварийного отключения ВЛ-35кВ «Мусковит-Слюдянка» в Мамско-Чуйском филиале ОКЭ. Отключение произошло вследствие торнадо, шквалистого ветра, в результате чего произошло обрушение ЛЭП. В результате без централизованного электроснабжения остался поселок Согдиондон, в котором работала ДЭС. Общий недоотпуск составил 56,5 тыс. кВт·ч, материальный ущерб – около 68000 руб. Четыре последующих отказа произошли с 3 по 19 июня в сетях 10 кВ в Черемховском, Тайшетском и Иркутском филиалах. Общая продолжительность составила 57 ч, недоотпуск – 22 тыс. кВт·ч. Материальный ущерб составил 27 тыс. руб. Причинами стали повреждение разъединителя, обрыв провода и падение дерева (2 случая). Последний, 7-й отказ, произошел в электрических сетях Ангарского филиала ОКЭ. Причина – выход из строя силового трансформатора 35/6 кВ. Вследствие замены трансформатора без электроснабжения в течение 12 ч остались три садоводства, деревня и оздоровительный лагерь, недоотпуск энергии составил 50,3 кВт·ч, материальный ущерб – 60,4 тыс. руб.

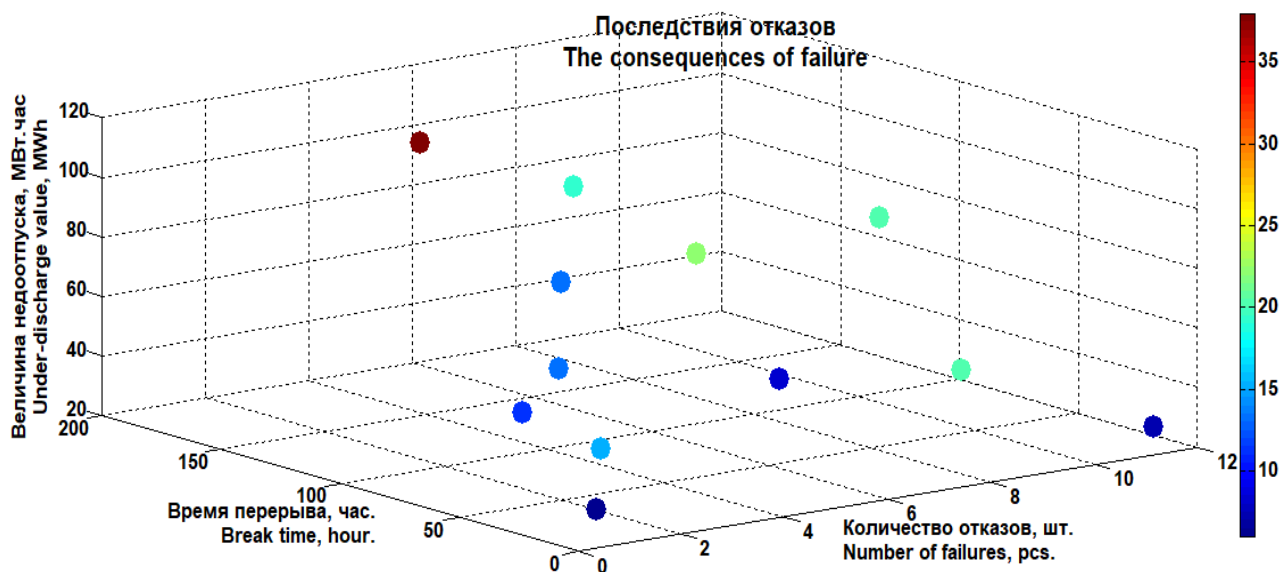


Рис. 4. Диаграмма изменения общего количества отказов по филиалам ОКЭ и их последствия в 2019 г.

В исследуемом 2019 г. в июле из-за усиления ветра и идущих три дня дождей в сетях ОГУЭП «Облкоммунэнерго» в Иркутской области произошло более 60 отключений электроэнергии на линиях практически всех классов напряжения. Основными причинами становились падение деревьев, разрушение изоляторов, короткие замыкания, в том числе на подключенных к сетям областного предприятия частных линиях, а также аварии на сетях компаний-партнёров, от которых ОКЭ получает электроэнергию в свои сети. В целом, отключения затронули порядка 60 тыс. человек, социальные и административные объекты, сообщает пресс-служба предприятия. В г. Тулуне по заявке местной администрации проводилось профилактическое отключение электроэнергии ряда улиц, на которых возникла угроза подтопления [19].

Выводы

1. Повреждаемость исследуемых сетей достаточно высока. Общее количество за год составило 192 отказа. Наибольшее количество повреждений произошло в апреле и октябре.

2. Наиболее повреждаемыми элементами рассматриваемых ВЛЭП являются: провода, опоры, изоляторы и коммутационные аппараты. Характерными причинами, которые приводят к их повреждениям – ветровая нагрузка, повреждение коммутационных аппаратов.

3. Схлестывание и перехлест проводов связаны с разбалансировкой стрел провеса проводов, приводящей к разноуровневым амплитудам их колебаний при шквалистой ветровой нагрузке. В рассматриваемых ЛЭП необходим тщательный визуальный мониторинг и осуществление на его основе перетяжки проводов.

5. Повреждение коммутационной аппаратуры (в основном это включение разъединителей на «закоротку» и отключение их «под нагрузкой») в большинстве случаев связано с неправомерным действием оперативного персонала и невыполнением предусмотренных нормативными документами плановых мероприятий и ремонтов в полном объеме. Необходимо повысить уровень квалификации технического персонала путём организации и прохождения ими специальных курсов повышения квалификации, а также внеочередного квалификационного контроля знаний ПТЭЭ и ПТБ.

6. Оперативное реагирование на повреждение и сокращение недоотпуска электроэнергии связаны также с модернизацией уровня автоматизации и средств РЗ и внедрением новых технологий телемеханики. В этой связи рекомендуется организация устройства реклоузелов в узловых точках ВЛЭП, что в значительной степени повысит «наблюдаемость» этих сетей.

7. Повреждения, вызванные «падением деревьев», можно значительно сократить, осуществляя предварительные мероприятия по расчистке трасс прохождения ЛЭП (в сельской местности), а также проведение мониторинга по определению «угрожающих» деревьев вдоль трасс ЛЭП городских и районных сетей.

Библиографический список

1. Grakowski L., Chojnacki A.L., Gebczyk K., Banasik K. Statistical Analysis and Modeling of the Reliability of Overhead Low Voltage Lines. *Przeglad elektrotechniczny*. vol. 95, no. 12, 2019. p. 261-264. doi: 10.15199/48.2019.12.59.
2. Chatterjee, S., Roy, B. (2019). Prediction of Line Contingency Catastrophic Failures Using Synchrophasor. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*. 30 (6): 1107-1115. – doi: 10.1007/s40313-019-00501.
3. Campbell, R. J. Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency. Congressional Research Service Report; Congressional Research Service. – Washington; DC; USA, 2012. – P. 1-15.
4. Kazim, M., Khawaja, A.H., Zabit, U., et al. (2020). Fault Detection and Localization for Overhead 11-kV Distribution Lines With Magnetic Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. V. 69, No. 5, part 1. – P. 2028-2038. – doi: 10.1109/TIM.2019.2920184.
6. Reed, D. Electric utility distribution analysis for extreme winds. (2008). *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 96: 123-140.
7. Васильева, Т. Н. Анализ причин отказов электрического оборудования распределенных сетей 0,38...10 кВ / Т. Н. Васильева, Е. И. Лопатина. – Текст: непосредственный // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2011. – № 3 (11). – С. 64-66.

8. Sultan, V., Hilton, B. (2020). A Spatial Analytics Framework to Investigate Electric Power-Failure Events and Their Causes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. V. 9 (1), No. 54. doi: 10.3390/ijgi9010054.

9. Рыбаков, Л. М. Прогнозирование отказов и планирование резерва запасных элементов, аппаратов и оборудования распределенных электрических сетей 10 кВ / Л. М. Рыбаков, З. Г. Иванова. – Текст: непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 104-110.

10. Шаулева, Н. М. Влияние природно-климатических факторов на эксплуатационную надежность распределительных сетей угольных разрезов / Н. М. Шаулева, А. Г. Захарова, Д. К. Стариченко. – Текст: непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 1. – С. 114-116.

10. Техническое состояние сетей Облкомунэнерго. – URL: <https://xn--38-9kci3agjakafdg2a8b2l.xn--p1ai/about/statistics/technicalstate/> (дата обращения: 03.01.2021). – Текст: электронный.

11. Дубровин, И. Износ электросетевой инфраструктуры в России. Масштабы и перспективы. – URL: <https://regnum.ru/news/it/2348996.html> (дата обращения: 03.01.2021). – Текст: электронный.

12. StatNet. Arasstatistikk 2007-2016. – URL: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Nedlastingssejter/Feilstatistikk> (date of request: 03.01.2021).

13. Council of European Energy Regulators. CEER Benchmarking Report 6.1 on the Continuity of Electricity supply: Data update. Issued by Council of European Energy Regulators ASBL. – Brussels: CEER. – 2018. – 84 p. – Текст: непосредственный.

14. Приказ Министерства энергетики РФ от 29 ноября 2016 г. № 1256 «Об утверждении Методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций». – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71478114/#131210> (дата обращения: 29.12.2020). – Текст: электронный.

15. Для жителей Иркутской области установлены тарифы на электроэнергию на

2019 год. – URL: <https://www.gazetairkutsk.ru/money/dlya-zhitelej-irkutskoj-oblasti-ustanovleny-tarifny-na-elektroenergiyu-na-2019-god> (дата обращения: 03.01.2021). – Текст: электронный.

16. Li Wang. The Fault Causes of Overhead Lines in Distribution Network / Li Wang. – Text: electronic // MATEC Web of Conferences 61, 02017 (2016). – URL: [APOP2016//DOI:10.1051/mateconf/2016610APOP2016](https://doi.org/10.1051/mateconf/2016610APOP2016), 2017:1-5.

17. Наумов, И. В. Анализ причин повреждаемости распределительных электрических сетей 10 кВ (на примере Южных электрических сетей г. Иркутска) / И. В. Наумов, Е. Н. Карпова. – Текст: непосредственный // Надежность и безопасность энергетики. – 2018. – Т. 11 (4). – С. 299-304.

18. Кабашов, В. Ю. Повышение надежности сельских воздушных линий электропередачи 10 (6) кВ в условиях воздействия ветровых и гололедных нагрузок: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кабашов Владимир Юрьевич. – Москва, 2011. – 35 с. – Текст: непосредственный.

19. Электроэнергия на сетях «Облкомунэнерго» за выходные отключалась более 60 раз. – URL: <https://irkutsk.bezformata.com/listnews/elektroenergiya-na-setyah-oblkommunenergo/76568403/> (дата обращения: 03.01.2021). – Текст: электронный.

References

1. Grakowski L., Chojnacki A.L., Gebczyk K., Banasik K. Statistical Analysis and Modeling of the Reliability of Overhead Low Voltage Lines. *Przegląd elektrotechniczny*. vol. 95, no. 12, 2019. pp. 261-264. doi: 10.15199/48.2019.12.59

2. Chatterjee, S., Roy, B. (2019). Prediction of Line Contingency Catastrophic Failures Using Synchrophasor. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*. 30 (6): 1107-1115. – doi: 10.1007/s40313-019-00501.

3. Campbell, R. J. Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency. Congressional Research Service Report; Congressional Research Service. – Washington; DC; USA, 2012. – P. 1-15.

4. Kazim, M., Khawaja, A.H., Zabit, U., et al. (2020). Fault Detection and Localization for Overhead 11-kV Distribution Lines With Magnetic

Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. V. 69, No. 5, part 1. – P. 2028-2038. – doi: 10.1109/TIM.2019.2920184.

5. Reed, D. Electric utility distribution analysis for extreme winds. (2008). *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96: 123-140.

6. Vasileva, T. N. Analiz prichin otkazov elektricheskogo oborudovaniya raspredelennykh setey 0,38...10 kV / T. N. Vasileva, E. I. Lopatina. – Tekst: neposredstvennyy // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva. – 2011. – No. 3 (11). – S. 64-66.

7. Sultan, V., Hilton, B. (2020). A Spatial Analytics Framework to Investigate Electric Power-Failure Events and Their Causes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. V. 9 (1), No. 54. doi: 10.3390/ijgi9010054.

8. Rybakov, L. M. Prognozirovaniye otkazov i planirovaniye rezerva zapasnykh elementov, apparatov i oborudovaniya raspredelennykh elektricheskikh setey 10 kV / L. M. Rybakov, Z. G. Ivanova. – Tekst: neposredstvennyy // Vestnik Chuvashskogo universiteta. – 2015. – No. 1. – S. 104-110.

9. Shauleva, N. M. Vliyaniye prirodno-klimaticheskikh faktorov na ekspluatatsionnyuyu nadezhnost raspredelitelnykh setey ugolnykh razrezov / N. M. Shauleva, A. G. Zakharova, D. K. Starichenko. – Tekst: neposredstvennyy // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2020. – No. 1. – S. 114-116.

10. Tekhnicheskoye sostoyaniye setey Oblkomunenergo. – URL: <https://xn--38-9kcij3agjakafdg2a8b2l.xn--p1ai/about/statistics/technicalstate/> (data obrashcheniya: 03.01.2021). – Tekst: elektronnyy.

11. Dubrovin, I. Iznos elektrosetevoy infrastruktury v Rossii. Masshtaby i perspektivy. – URL: <https://regnum.ru/news/it/2348996.html> (data obrashcheniya: 03.01.2021). – Tekst: elektronnyy.

12. StatNet. Arasstatistikk 2007-2016. – URL: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Nedlastingsse-nter/Feilstatistikk> (date of request: 03.01.2021).

13. Council of European Energy Regulators. CEER Benchmarking Report 6.1 on the Continuity of Electricity supply: Data update. Issued by Council of European Energy Regulators ASBL. – Brussels: CEER. – 2018. – 84 p.

14. Prikaz Ministerstva energetiki RF ot 29 noyabrya 2016 g. № 1256 «Ob utverzhdenii Metodicheskikh ukazaniy po raschetu urovnya nadezhnosti i kachestva postavlyaemykh tovarov i okazyvaemykh uslug dlya organizatsii po upravleniyu edinoy natsionalnoy (obshcherossiyskoy) elektricheskoy setyu i territorialnykh setevykh organizatsiy». – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71478114/#131210> (data obrashcheniya: 29.12.2020). – Tekst: elektronnyy.

15. Dlya zhiteley Irkutskoy oblasti ustanovleny tarifny na elektroenergiyu na 2019 god. – URL: <https://www.gazetairkutsk.ru/money/dlya-zhitelej-irkutskoj-oblasti-ustanovleny-tarifny-na-elektroenergiyu-na-2019-god> (data obrashcheniya: 03.01.2021). – Tekst: elektronnyy.

16. Li Wang. The Fault Causes of Overhead Lines in Distribution Network / Li Wang. – Text: electronic // MATEC Web of Conferences 61, 02017 (2016). – URL: [APOP2016//DOI:10.1051/mateconf/2016610APOP2016,2017:1-5](https://doi.org/10.1051/mateconf/2016610APOP2016,2017:1-5).

17. Naumov, I. V. Analiz prichin povrezhdamosti raspredelitelnykh elektricheskikh setey 10 kV (na primere Yuzhnykh elektricheskikh setey g. Irkutskaya) / I. V. Naumov, E. N. Karpova. – Tekst: neposredstvennyy // Nadezhnost i bezopasnost energetiki. – 2018. – T. 11 (4). – S. 299-304.

18. Kabashov, V. Yu. Povysheniye nadezhnosti selskikh vozduzhnykh liniy elektroperedachi 10 (6) kV v usloviyakh vozdeystviya vetrovykh i gololednykh nagruzok: avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Kabashov Vladimir Yurevich. – Moskva, 2011. – 35 s. – Tekst: neposredstvennyy.

19. Elektroenergiya na setyakh «Oblkomunenergo» za vykhodnye otklyuchalas bolee 60 raz. – URL: <https://irkutsk.bezformata.com/listnews/elektroenergiya-na-setyah-oblkommunenergo/76568403/> (data obrashcheniya: 03.01.2021). – Tekst: elektronnyy.

