

Электроэнергетика Electric power engineering

Научная статья
УДК 621.315
DOI: 10.14529/power230401

АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ В КАБЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6 (10) кВ

А.В. Коржов¹, korzhovav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>
В.И. Сафонов¹, safonovvi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6452-9286>
Р.М. о. Бабаев¹, asp22brm768@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0931-4543>
Я.Е. Коростелев^{1,2}, iankorostelev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0584-4643>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² АО «Энергия + 21», п. Увельский, Челябинская обл., Россия

Аннотация. Статья посвящена исследованию состояния кабельных распределительных сетей напряжением 6 (10) кВ и их повреждаемости в процессе эксплуатации. Проведен анализ технологических нарушений по десяти филиалам ПАО «Россети» с 2018 по 2022 год. Проведена систематизация полученных данных согласно приказу № 90 Министерства энергетики Российской Федерации от 2010 г. Подробно проанализированы аварийные отключения в кабельных сетях г. Челябинска. На примере Челябинских городских сетей рассмотрены групповые повреждения, возникающие в результате эксплуатации.

Ключевые слова: технологические нарушения, распределительная сеть, кабельная линия, перенапряжения, коммутационные перенапряжения, пробой изоляции, короткое замыкание, однофазное замыкание на землю, изоляция, остаточный ресурс, повреждаемость кабельных линий, надежность

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10201, <https://rscf.ru/project/23-29-10201/>

Для цитирования: Анализ статистики технологических нарушений в кабельных распределительных сетях 6 (10) кВ / А.В. Коржов, В.И. Сафонов, Р.М. о. Бабаев, Я.Е. Коростелев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 4. С. 5–13. DOI: 10.14529/power230401

Original article
DOI: 10.14529/power230401

AN ANALYSIS OF THE STATISTICS OF TECHNOLOGICAL DISRUPTIONS IN A MEDIUM VOLTAGE CABLE DISTRIBUTION NETWORK

A.V. Korzhov¹, korzhovav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>
V.I. Safonov¹, safonovvi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6452-9286>
R.M. o. Babayev¹, asp22brm768@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0931-4543>
I.E. Korostelev^{1,2}, iankorostelev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0584-4643>

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² “Energy + 21” JSC, Uvelskiy vilage, Chelyabinsk region, Russia

Abstract. This article studies the cable for distribution networks with a voltage of 6 (10) kV and their damage during operation. The analysis of technological disruptions was carried out for ten branches of PJSC ROSSETI from 2018 to 2022. The data were systematized according to Order No. 90 of the Russian Ministry of Energy, dated 2010. Emergency power outages in the cable networks of Chelyabinsk were analyzed in detail. Using the example of Chelyabinsk city networks, network damage during operation is considered.

Keywords: technological disruptions, distribution network, cable line, overvoltages, switching overvoltages, insulation breakdown, short circuit, single-phase earth fault, insulation, residual life, cable line damage, reliability

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-10201, <https://rscf.ru/project/23-29-10201/>

For citation: Korzhov A.V., Safonov V.I., Babayev R.M. o., Korostelev I.E. An analysis of the statistics of technological disruptions in a medium voltage cable distribution network. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(4):5–13. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230401

Введение

В электросетевой инфраструктуре используется большое количество кабелей с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) с минимальным остаточным ресурсом эксплуатации. Согласно положению ПАО «Россети» [1] срок службы кабелей с учётом эксплуатационных мероприятий должен составлять не менее 30 лет. Однако чаще всего фактический срок эксплуатации кабельных линий (КЛ) значительно превышает данное значение, что, в свою очередь, приводит к возникновению частых технологических отключений [2–5].

Сбои в электроснабжении, вызванные выходом из строя отработавшего участка кабельной распределительной сети, могут быть обусловлены большим количеством факторов [6–8]. Значительное количество аварийных отключений происходит вследствие естественного старения изоляции, приводящего к её дальнейшему пробою в результате несвоевременного выявления/устранения однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), межфазных коротких замыканий (КЗ) и под действием перенапряжений различной природы [6, 9–12].

В настоящее время как в существующих, так и во вновь проектируемых сетях активно внедряются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Несмотря на преимущества, характерные СПЭ-кабелям [13], на данный момент невозможно осуществить одновременную замену существующих КЛ, в том числе с другими типами изоляции. Это обусловлено значительными материальными затратами, которые замедляют темпы модернизации и приводят к увеличению технологических нарушений (ТН), связанных с выходом из строя участков кабельной сети. Более того, замена поврежденного участка сети на новый тип КЛ влияет на вероятность возникновения пространственного резонанса [14, 15]. Наиболее опасными для возникновения пространственного резонанса являются участки с большой неоднородностью характеристических сопротивлений, наличием в сети неоднородных объектов и с большой разветвленностью сети. Совокупность вышеперечисленных факторов прямо влияет на методы и подходы к модернизации и повышению надежности КЛ. Однако на текущий момент системный анализ коренных причин технологических нарушений либо отсутствует, либо не является исчерпывающим. Таким образом, цель данного исследования заключается в анализе и систематизации имеющейся статистики аварийных отключений в распределительных кабельных сетях напряжением 6 (10) кВ. Таким образом, цель данного исследования заключается в анализе статистики аварийных отключений в распределительных кабельных сетях напряжением 6 (10) кВ.

Технологические отключения, возникающие при авариях в распределительных сетях напряже-

нием 6–10 кВ, представляют собой распространенное явление. Так, согласно [16] отключения в сетях данного напряжения составляют до 70 % всех сбоев электроснабжения потребителей, которые возникают в результате ОЗЗ и межфазных КЗ. В качестве основных причин, способствующих возникновению подобных аварийных, выделяют:

- естественное старение и снижение электрической прочности изоляции;
- наличие дефектов (недостатки проекта, конструкции, изготовления и монтажа);
- возникновение перенапряжений;
- механическое воздействие при земельно-строительных работах;
- неблагоприятные природные явления.

Более того, согласно [10] за последние 20 лет количество ОЗЗ, вызванных коммутационными перенапряжениями, возросло в 5 раз, что объясняется использованием вакуумных выключателей, старением изоляции КЛ и общим усложнением топологии сети, в том числе с учетом адаптивной конфигурации. Подобная тенденция наблюдается во многих сетях среднего класса напряжения. Например, в [17] на основе статистических данных исследовалась аварийность сетей горнодобывающих предприятий. Авторы работы показывают распределение ОЗЗ по элементам системы электроснабжения. Так, ими выделяется, что с 1995 по 2003 г. большая часть подобных явлений приходилось на КЛ и ВЛ. С 2010 по 2018 г. количество ОЗЗ, связанных с повреждением КЛ и ВЛ, также превалирует (48,5 %). В качестве основных причин отключений авторы выделяют грозовые и коммутационные перенапряжения, старение изоляции, механическое воздействие, перенапряжения в режиме ОЗЗ, перегрузка и т. д. Из [17] можно сделать вывод о значительном увеличении числа ОЗЗ, обусловленных коммутационными перенапряжениями и перегрузками. Если же рассматривать КЛ, то наиболее частой причиной и уязвимым элементом КЛ является пробой изоляции кабельной разделки.

В [11] общая динамика ТН за период с 1994 по 2019 г. свидетельствует о снижении количества повреждений ввиду модернизации сети и заменой устаревших кабелей. При этом большинство нарушений приходилось на КЛ 6 (10) кВ, эксплуатационный срок которых превышает 30 лет, а основными причинами возникновения повреждений являются ранее упомянутые. В соответствии с [9], электроснабжение в г. Омске выполнено преимущественно с использованием БМИ КЛ 6 (10) кВ, уровень износа которых составляет от 64,4 до 71,64 %. Авторами [9] наблюдалось увеличение числа отказов, что объяснялось старением изоляции и нарушениями технологий монтажа муфт, что приводило к их повреждению. Аналогичная негативная динамика также наблюдается в работе [12].

**Анализ данных по филиалам
ПАО «Россети»**

Для оценки степени повреждаемости КЛ в работе была использована ежегодно публикуемая статистика ТН по десяти филиалам ПАО «Россети»: Челябинэнерго, Свердловэнерго, Пермэнерго, Ленэнерго (Санкт-Петербург), Архангэнерго, Комиэнерго, Псковэнерго, Смоленскэнерго, Костромаэнерго, Белгородэнерго) [2–5]. Общее количество ТН, участвующих в анализе, составило 117485 шт., из которых было отобрано 13 103 случая повреждения КЛ 6 (10) кВ. Для классификации причин повреждения были использованы коды организационных причин повреждения в соответствии с [18].

Анализ данных на рис. 1 позволяет сделать вывод о том, что основная доля аварийных событий обусловлена невыполнением необходимых объемов работ по обслуживанию оборудования (к. 3.4.8). Более 10 и 15 % случаев повреждений КЛ возникает в результате воздействия посторонних лиц и организаций участвующих (к. 3.4.8, в ходе проведения земельно-строительных работ) и не участвующих (к. 3.4.9). Повреждения, приходящиеся на наличие дефектов в конструкции или же допущенных при монтаже, составляют 6,84 % от общего числа (к. 3.4.13). Процент повреждений

КЛ по причине влияния неблагоприятных природных явлений составил 4,53 % (к. 3.4.12.5).

При более детальном рассмотрении повреждений (рис. 2), относящихся к категории 3.4.7, можно установить, что основная часть таких ТН маркируются кодом износа и старения изоляции 3.4.7.3.5. Это позволяет сделать вывод о том, что в современных кабельных системах используется большое количество КЛ с минимальным остаточным ресурсом либо полностью исчерпавшие его. При анализе повреждений, относящихся к категории 3.4.13, можно установить, что большая часть таких повреждений связана с дефектами, возникающими в процессе монтажа (рис. 3), а именно:

- появлением вмятин на броне и оболочке, приводящих к разгерметизации и проникновению влаги;
- присутствием камней и строительного мусора в подсыпке либо же полным отсутствием подсыпки;
- надломе бумажной изоляции жил кабеля в корешке концевой заделки КЛ;
- изгибом кабеля с радиусом меньшим, чем допустимый, с последующим выпрямлением;
- неправильным монтажом муфт, пересушкой поясной и фазной изоляции.

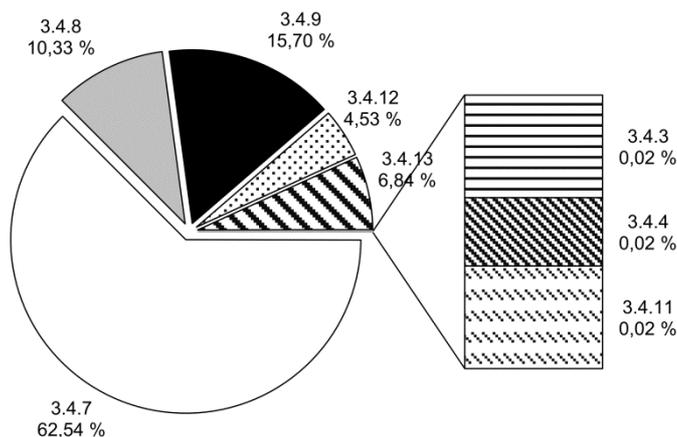


Рис. 1. Технологические нарушения с 2018 по 2022 г. по 10 филиалам
Fig. 1. Technological disruptions from 2018 to 2022 in 10 branches

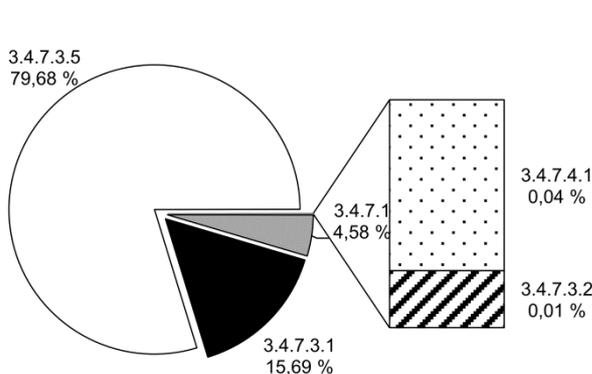


Рис. 2. Технологические нарушения, код 3.4.7
Fig. 2. Technological disruptions, code 3.4.7

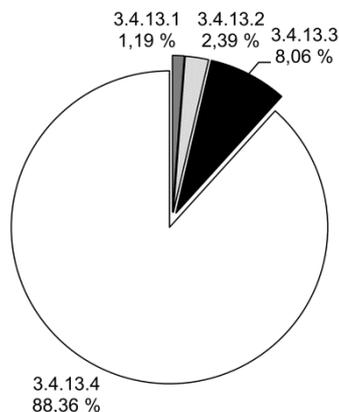


Рис. 3. Технологические нарушения, код 3.4.13
Fig. 3. Technological disruptions, code 3.4.13

Информация о распределении повреждений по месяцам и организационным причинам по остальным городам представлена на рис. 4–8. Как видно из рис. 4а–7а, большое количество технологических повреждений происходит с апреля по сентябрь. Это явление может быть объяснено следующими факторами:

- увеличением температуры окружающей среды, влияющей на температурный баланс КЛ;
- пучением и просадкой грунта;
- наличием влаги (таяние снега, льда, дожди и т. д.);
- активными земельными работами (санкционированными/несанкционированными), приводя-

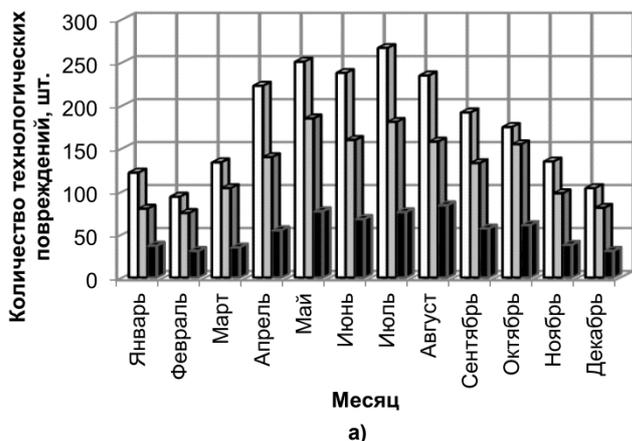


Рис. 4. Распределение повреждений по месяцам (а); по причинам (б) в филиалах ПАО «Россети Урал»
Fig. 4. Distribution of damages (a) by month and (b) by cause in branches of PJSC Rosseti Ural

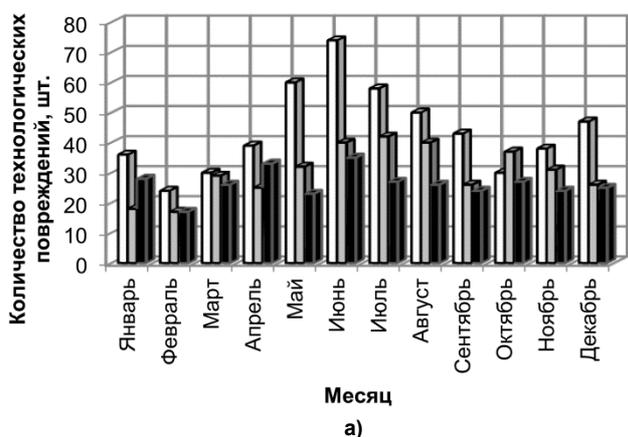


Рис. 5. Распределение повреждений по месяцам (а); по причинам (б) в филиале ПАО «Россети Северо-Запад»
Fig. 5. Distribution of damages (a) by month and (b) by cause in the North-West branch of PJSC Rosseti

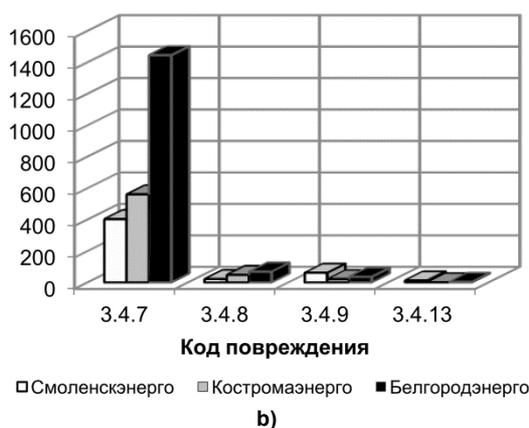
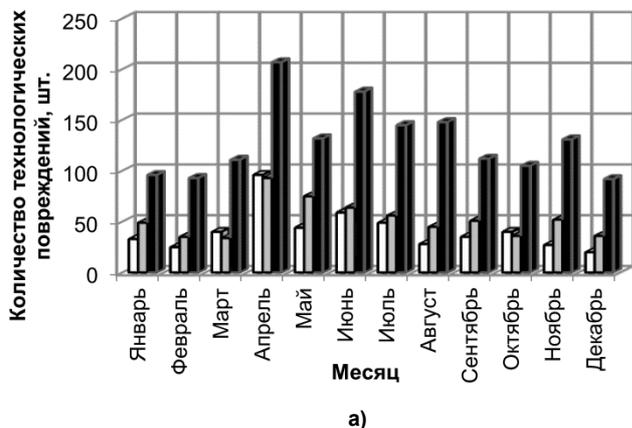


Рис. 6. Распределение повреждений по месяцам (а); по причинам (б) в филиале ПАО «Россети Центр»
Fig. 6. Distribution of damages (a) by month and (b) by cause in the Central branch of PJSC Rosseti

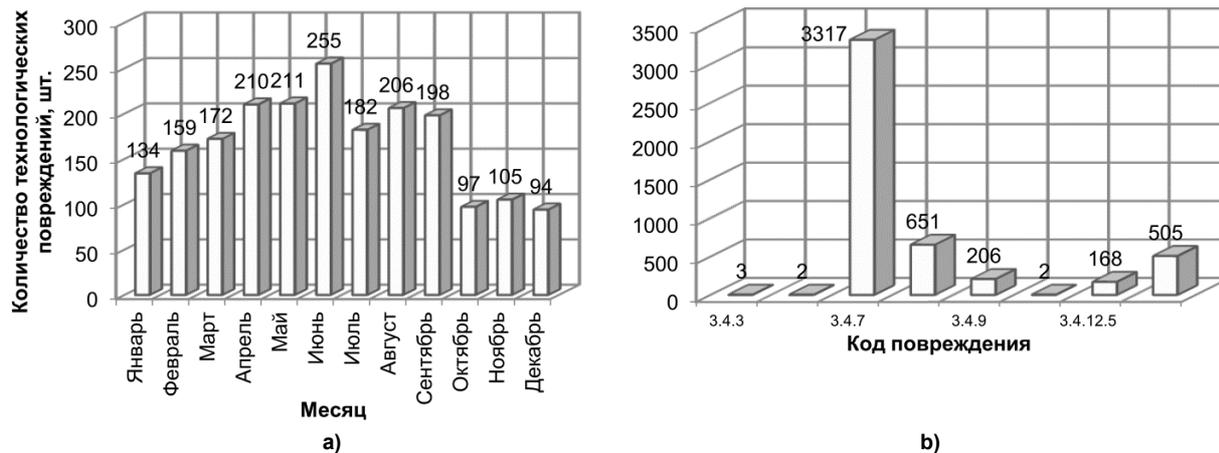


Рис. 7. Распределение повреждений по месяцам (а); по причинам (б) в филиале ПАО «Россети Ленэнерго», г. Санкт-Петербург

Fig. 7. Distribution of damages (a) by month and (b) by cause in the "Rosseti Lenenergo", St. Petersburg branch of PJSC Rosseti

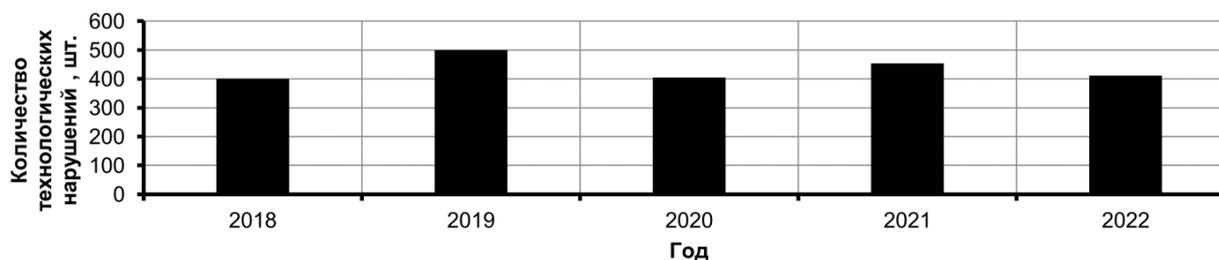


Рис. 8. Динамика повреждаемости КЛ 6 (10) кВ с 2018 по 2022 г., г. Челябинск

Fig. 8. Damage to 6 (10) kV cable from 2018 to 2022, Chelyabinsk

щими к механическим повреждениям кабельной инфраструктуры.

Проведен детальный анализ данных, относящихся к энергетической компании «Челябэнерго». В период с 2018 по 2022 г. в г. Челябинске было зарегистрировано 2170 ТН в кабельных сетях напряжением 6 (10) кВ (рис. 8). Средний срок эксплуатации таких КЛ составляет 44 года, что превышает гарантированный срок службы, установленный производителем, на 30–43 %.

На рис. 9 представлена общая статистика по-

вреждений городских сетей г. Челябинска, где А – повреждения, не зависящие от состояния изоляции, Б – повреждения изоляции в ранее поврежденном месте при рабочем напряжении, В – пробои муфт при рабочем напряжении, Г – повреждения изоляции в ранее не поврежденном месте при испытаниях повышенным напряжением, Д – пробои муфт при проведении испытаний повышенным напряжением, Е – повреждения изоляции в сухой разделке, Ж – повреждения по неустановленным причинам.

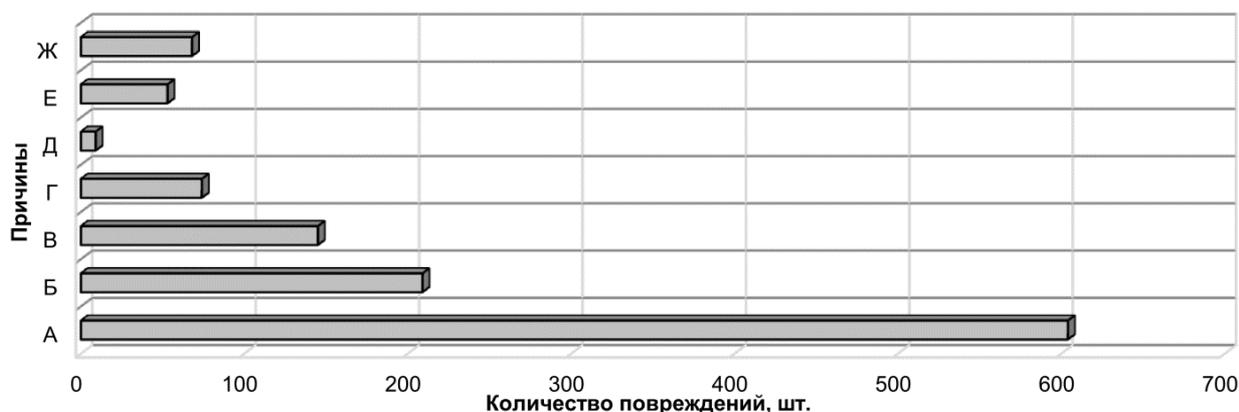


Рис. 9. Соотношение различных повреждений изоляции КЛ, г. Челябинск

Fig. 9. The ratio of damage to the insulation of the cable line, Chelyabinsk

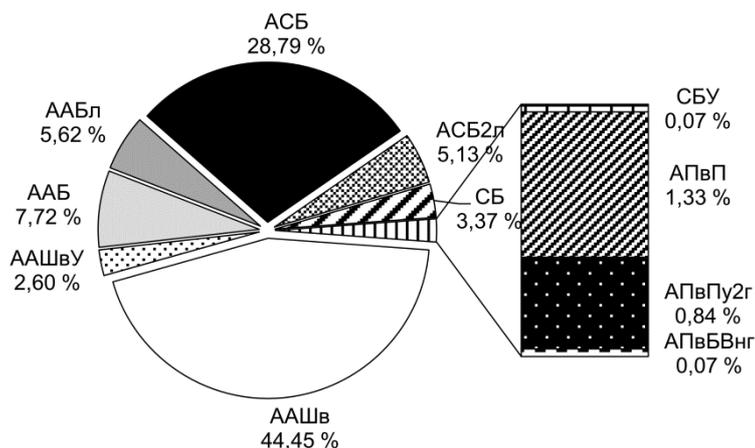


Рис. 10. Распределение повреждений по типам КЛ в филиале «Челябэнерго»
Fig. 10. Damages by types of cable line in the "Chelyabenergo" branch

В соответствии с рис. 10 можно заметить, что основная часть аварий происходит на кабелях с БМИ. Это объясняется тем, что общая протяженность таких КЛ составляет порядка 1024 км [8]. Кроме того, было установлено, что 44,45 % технологических нарушений происходят на КЛ типа AAШв. Высокая степень повреждаемости кабелей AAШв может быть обусловлена наличием значительного числа ранее заложённых кабелей данного типа в существующих распределительных сетях. Тем самым исключается возможность их ускоренной замены.

В процессе анализа была обнаружена относительно новая тенденция – возникновение групповых аварий. Наблюдается, что появление одного нарушения приводит к последующим авариям в кабелях, расположенных вблизи исходного места. Так, было установлено, что 43 % повреждений, произошедших с 2017 по 2022 г. на одном из распределительных пунктов (РП) г. Челябинска, приходится на групповые. Все групповые нарушения произошли исключительно на участках, эксплуатационный срок которых превышал 30 лет. Основными причинами подобных аварий являлись перенапряжения различной природы (возникающие в результате коммутаций, ОЗЗ, межфазных КЗ и т. д.), которые приводили к группировке повреждений, где эксплуатационный срок КЛ превышает предусмотренное значение. Возникновение подобных перенапряжений негативно сказывается не только на состарившейся изоляции, но способствует возникновению, накоплению и развитию дефектов во вновь проложенных участках сети.

Заключение

В ходе проведенных исследований было установлено, что большое количество технологических повреждений КЛ 6 (10) кВ обусловлено старением основной изоляции КЛ, наличием дефектов, допущенных при монтаже, а также механических воздействий. Согласно результатам предшествующих исследований можно утверждать, что увеличение количества ТН отмечается во многих городских распределительных сетях. Уменьшение количества повреждений в кабельных сетях возможно:

- при повышении надёжности сетей путём модернизации и замены КЛ, отработавших нормативный срок службы, на новые;
- использовании устройств защиты от перенапряжений, возникающих в результате коммутаций, либо же при ОЗЗ, КЗ и т. д., позволяющих снизить негативное влияние на изоляцию КЛ и исключают возможность возникновения групповых повреждений;
- повышении качества обслуживания при производстве монтажных работ, тем самым уменьшая количество аварий по причине допущенных дефектов;
- замене существующего испытания повышенным напряжением на альтернативные неразрушающие способы диагностики состояния изоляции;
- создании программных обеспечений-библиотек, позволяющих проводить комплексный анализ состояния кабельной инфраструктуры.

Список литературы

1. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. М.: ОАО «Россети», 2017. 196 с.
2. Технологические нарушения. Сводные данные об аварийных отключениях в месяц по границам территориальных зон деятельности ОАО «МРСК Урала» в 2022 году // Россети Урал: сайт. URL: <https://rosseti-ural.ru/disclosure/monopoly/characteristic/disturbances/> (дата обращения: 28.02.2023).
3. О сводных данных об аварийных отключениях и мероприятиях по их устранению // Россети Северо-Запад: сайт. URL: <https://rosseti-sz.ru/infodisclosure/2standartdisclosure/-11avarii/> (дата обращения: 28.02.2023).

4. Информация о сводных данных об аварийных отключениях в месяц по границам территориальных зон деятельности организации, вызванных авариями или внеплановыми отключениями объектов электросетевого хозяйства, с указанием даты аварийного отключения объектов электросетевого хозяйства и включения их в работу // Россети Ленэнерго: сайт. URL: <https://rosseti-lenenergo.ru/standart/4006.html#tab1664> (дата обращения: 07.04.2023).
5. Техническое состояние сетей // Россети Центр: сайт. URL: <https://www.mrsk-1.ru/customers/territory/networks/> (дата обращения: 07.04.2023).
6. Кучеренко Д.Е. Методы и средства контроля состояния кабельных линий // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2016. Vol. 8, no. 7. P. 74–78.
7. Продление срока службы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в электрических сетях среднего напряжения с помощью резистивного заземления нейтрали / Ю.П. Гусев, Г.Ч. Чо, С.А. Талакин, Д.Ю. Растегняев // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2018. Т. 4, № 49. С. 82–85.
8. Коржов А.В. Комплексный анализ состояния и повышения эксплуатационной надежности кабельных линий 6 (10) кВ с бумажной пропитанной изоляцией в условиях городских электрических сетей: специальность 05.09.02 «Электротехнические материалы и изделия»: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ОАО «ВНИИКП», 2016. 382 с.
9. Козлей С.В., Хацевский К.В. Проблемы эксплуатации кабельных линий 10/0,4 кВ // *Актуальные вопросы энергетики: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* Омск: Изд-во Омск. гос. техн. ун-та, 2017. С. 56–60.
10. Kuzmin R.S., Menshikov V.A., Kuzmin I.S. Switching Overvoltages in Single Phase Ground Fault Mode in Networks 6–10 kV // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020. P. 4.
11. Михалкова Е.Г., Турсунбекова А.Б. Применение актуальных технических решений для повышения эффективности работы распределительных электрических сетей // *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2019. Вып. 11-1 (55). С. 163–172.
12. Петров Д.В., Маругин В.И., Петров А.В. Анализ аварийности и сроков восстановления городских кабельных линий 6–10 кВ // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2022. № 1 (1). С. 7–14. DOI: 10.37493/2307-907X.2022.1.1
13. Кри С., Баринов В.А. Сравнительный анализ кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией и кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на энергетическом рынке России // *Энергия единой сети*. 2014. Т. 5, № 16. С. 52–64.
14. Дмитриев М. В. Кабельные линии высокого напряжения. СПб.: Политех-пресс, 2021. 686 с.
15. Коржов А.В., Волков О.В., Коровин Ю.В. Исследования перенапряжений по длине неоднородной распределительной кабельной сети // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2020. Т. 20, № 1. С. 22–29. DOI: 10.14529/power200103
16. Complex of technical solutions for protection and selective signaling of single-phase earth faults in 6–10 kV distribution cable networks / V. Shuin, T. Shadrikova, O. Dobryagina, E. Shagurina // *E3S Web Conf. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020)*. 2020. Vol. 216. P. 5.
17. Однофазные замыкания на землю в сетях 6–10 кВ и электротравматизм на угольных разрезах / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков и др. // *Известия вузов. Горный журнал*. 2020. № 1. С. 113–123. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-113-123
18. Министерство энергетики Российской Федерации. Приказ от 2 марта 2010 г. N 90. Об утверждении формы акта о расследовании причин аварий в электроэнергетике и порядка ее заполнения: дата введения 22-04-2010. 30 с.

References

1. *Polozheniye OAO “Rosseti” o edinoy tekhnicheskoy politike v elektrosетevom komplekse* [The Regulation of JSC Rosseti on the unified technical policy in the electric grid complex]. Moscow: JSC “Rosseti”; 2017. 196 p. (In Russ.)
2. *Tekhnologicheskkiye narusheniya. Svodnyye dannyye ob avariynykh otklyucheniyyakh v mesyats po granitsam territorial’nykh zon deyatel’nosti OAO “MRSK Urala” v 2022 godu* [Technological disruptions. Summary data on emergency shutdowns per month along the borders of the territorial zones of activity of IDGC of the Urals in 2022]. *Rosseti Ural: website*. (In Russ.) Available at: <https://rosseti-ural.ru/disclosure/monopoly/characteristic/disturbances/> (accessed 02.28.2023).
3. *O svodnykh dannykh ob avariynykh otklyucheniyyakh i meropriyatiyakh po ikh ustraneniyu* [About summary data on emergency shutdowns and measures to eliminate them]. *Rosseti North-West: website*. (In Russ.) Available at: <https://rosseti-sz.ru/infodisclosure/2standartdisclosure/-11avarii/> (accessed 02.28.2023).

4. *Informatsiya o svodnykh dannykh ob avariynnykh otklyucheniyyakh v mesyats po granitsam territorial'nykh zon deyatel'nosti organizatsii, vyzvannykh avariymi ili vneplanovymi otklyucheniymi ob'yektov elektrosetevogo khozyaystva, s ukazaniyem daty avariynogo otklyucheniya ob'yektov elektrosetevogo khozyaystva i vklyucheniya ikh v rabotu* [Information on summary data on emergency outages per month along the boundaries of the territorial zones of the organization's activities caused by accidents or unplanned outages of power grid facilities, indicating the date of emergency shutdown of power grid facilities and their inclusion in the work]. *Rosseti Lenenergo: website*. (In Russ.) Available at: <https://rosseti-lenenergo.ru/standart/4006.html#tab1664> (accessed 07.04.2023).
5. *Tekhnicheskoye sostoyaniye setey* [Technical condition of networks]. *Rosseti Center: website*. (In Russ.) Available at: <https://www.mrsk-1.ru/customers/territory/networks/> (accessed 07.04.2023).
6. Kucherenko D.E. [Methods and means of monitoring the condition of cable lines]. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2016;8(7):74–78. (In Russ.)
7. Gusev Y.P., Cho G.C., Talakin S.A., Rastegnayev D.Yu. [Methods and means of monitoring the condition of cable lines]. *Electric power. Transmission and distribution*. 2018;4(49):82–85. (In Russ.)
8. Korzhov A.V. *Kompleksnyy analiz sostoyaniya i povysheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti kabel'nykh liniy 6 (10) kV s bumazhnoy propitannoy izolyatsiyey v usloviyakh gorodskikh elektricheskikh setey: spetsial'nost' 05.09.02 "Elektrotekhnicheskiye materialy i izdeliya": dis. d-ra tekhn. nauk* [Comprehensive analysis of the condition and improvement of operational reliability of 6 (10) kV cable lines with paper impregnated insulation in urban electrical networks: specialty 05.09.02 "Electrical materials and products". Doct. sci. diss.]. Moscow: All-Russian Research Design and Technological Institute of Cable Industry; 2016. 382 p. (In Russ.)
9. Kozlei S.V., Khatsevsky K.V. [Problems of operation of cable lines 10/0.4 kV]. In: *Actual issues of energy: materials of the International Scientific and Practical Conference*. Omsk: Omsk State Technical University Publ.; 2017. P. 56–60. (In Russ.)
10. Kuzmin R.S., Menshikov V.A., Kuzmin I.S. Switching Overvoltages in Single Phase Ground Fault Mode in Networks 6–10 kV. In: *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. P. 4.
11. Mikhalkova E.G., Tursunbekova A.B. Applying up-to-date technical solutions for improving the efficiency of electrical networks. *Current scientific research in the modern world*. 2019;11-1(55):163–172. (In Russ.)
12. Petrov D., Marugin V., Petrov A. Analysis of accident and restoration times of 6–10 kV urban cable lines. *Newsletter of North-Caucasus Federal University*. 2022;1(1):7–14. (In Russ.) DOI: 10.37493/2307-907X.2022.1.1
13. Kri S., Barinov V.A. [Comparative analysis of cables with paper-impregnated insulation and cables with insulation made of cross-linked polyethylene in the energy market of Russia]. *Energiya edinoy seti*. 2014;5(16):52–64. (In Russ.)
14. Dmitriev M. V. *Kabel'nyye linii vysokogo napryazheniya* [High voltage cable lines]. St. Petersburg: Polytech-press; 2021. 686 p. (In Russ.)
15. Korzhov A.V., Volkov O.V., Korovin Yu.V. Analysis of Overvoltage in Nonhomogeneous Distribution Cable Grids. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2020;20(1):22–29. (In Russ.) DOI: 10.14529/power200103
16. Shuin V., Shadrikova T., Dobryagina O., Shagurina E. Complex of technical solutions for protection and selective signaling of single-phase earth faults in 6–10 kV distribution cable networks. In: *E3S Web Conf. Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems" (RSES 2020)*. 2020. Vol. 216. P. 5.
17. Kuzmin S.V., Kuzmin R.S., Menshikov V.A., Umetskaia E.V. Single-phase ground short circuits in the 6–10 kV mains and electrical traumas in the coal mines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020;1:113–123. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-113-123
18. *Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii. Prikaz ot 2 marta 2010 g. N 90. Ob utverzhdenii formy akta o rassledovanii prichin avariiv v elektroenergetike i poryadka eye zapolneniya* [Ministry of Energy of the Russian Federation. Order of March 2, 2010 N 90. On approval of the form of the act on investigation of the causes of accidents in the electric power industry and the procedure for filling it out]. Date of introduction 22-04-2010. 30 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Коржов Антон Вениаминович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, проректор по научной работе, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; korzhovav@susu.ru.

Сафонов Валерий Иванович, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; safonovvi@susu.ru.

Бабаев Расим Мирсалам оглы, аспирант, инженер кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; asp22brm768@susu.ru.

Коростелев Ян Евгеньевич, аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; начальник отдела перспективных разработок, АО «Энергия + 21», п. Увельский, Челябинская обл., Россия; iankorostelev@gmail.com.

Information about the authors

Anton V. Korzhov, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, Vice-Rector for Research, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; korzhovav@susu.ru.

Valery I. Safonov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; safonovvi@susu.ru.

Rasim M. o. Babayev, Postgraduate Student, Engineer of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; asp22brm768@susu.ru.

Ian E. Korostelev, Postgraduate Student of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Head of Research and Development Department, “Energy + 21” JSC, Uvelskiy village, Chelyabinsk region, Russia; iankorostelev@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 08.09.2023; одобрена после рецензирования 07.11.2023; принята к публикации 08.11.2023.

The article was submitted 08.09.2023; approved after review 07.11.2023; accepted for publication 08.11.2023.