



УДК 621.372.8

doi: 10.21685/2587-7704-2023-8-2-7



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Методы обеспечения надежности волоконно-оптических систем передачи

Дмитрий Александрович Новичков

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
dimulya.novichkov.00@mail.ru

Александр Вячеславович Алланов

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
sashaallanov@yandex.ru

Никита Андреевич Борисов

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
andrey.bor975@mail.ru

Елена Александровна Бадеева

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
badeeva_elena@mail.ru

Аннотация. К функционированию современных волоконно-оптических телекоммуникационных систем предъявляются повышенные требования по надежности. Рассмотрены ключевые причины, по которым происходит повреждение оптоволоконных линий связи. Исследованы и классифицированы методы обеспечения надежности волоконно-оптических систем передачи.

Ключевые слова: волоконно-оптические технологии, волоконно-оптическая система передачи, оптическое волокно, волоконно-оптический кабель, надежность

Для цитирования: Новичков Д. А., Алланов А. В., Борисов Н. А., Бадеева Е. А. Методы обеспечения надежности волоконно-оптических систем передачи // Инжиниринг и технологии. 2023. Т. 8 (2). С. 1–8. doi: 10.21685/2587-7704-2023-8-2-7

Methods of ensuring the reliability of fiber-optic transmission systems

Dmitry A. Novichkov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
dimulya.novichkov.00@mail.ru

Alexander V. Allanov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
sashaallanov@yandex.ru

Nikita A. Borisov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
andrey.bor975@mail.ru

Elena A. Badeeva

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
badeeva_elena@mail.ru

Abstract. Increased reliability requirements are imposed on the functioning of modern fiber-optic telecommunication systems. The key reasons for the damage of fiber-optic communication lines are considered. Methods of ensuring the reliability of fiber-optic transmission systems are investigated and classified.

Keywords: fiber-optic technologies, fiber-optic transmission system, optical fiber, fiber-optic cable, reliability



For citation: Novichkov D.A., Allanov A.V., Borisov N.A., Badeeva E.A. Methods of ensuring the reliability of fiber-optic transmission systems. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2023;8(2):1–8. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2023-8-2-7

Введение

За последние несколько десятилетий информационные технологии развивались стремительными темпами, вызывая глубокие преобразования и изменения в нашем мире и образе жизни, произошел резкий прорыв в развитии волоконно-оптических технологий. Прежде всего, это произошло в результате динамичного роста потребностей в телекоммуникации. Ученым и инженерам, благодаря огромным усилиям и стараниям, удалось достигнуть существенно важных успехов в создании и развитии технологии изготовления оптического волокна (ОВ), обладающего на сегодняшний день низкими значениями собственного затухания в сочетании с удовлетворительной полосой пропускания.

Были разработаны компоненты для волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Полученные достижения в этой области в конце XX века способствовали к активному внедрению и развитию волоконно-оптических технологий при осуществлении современных, актуальных проектов телекоммуникационных услуг, а также способствовали росту доли высокоскоростных линий связи на рынке мобильных устройств [1–4].

Обсуждение

К работе современных ВОСП предъявляются довольно повышенные требования по надежности. Существует множество причин, по которым происходит повреждение оптоволоконных линий (рис. 1) [5, 6].

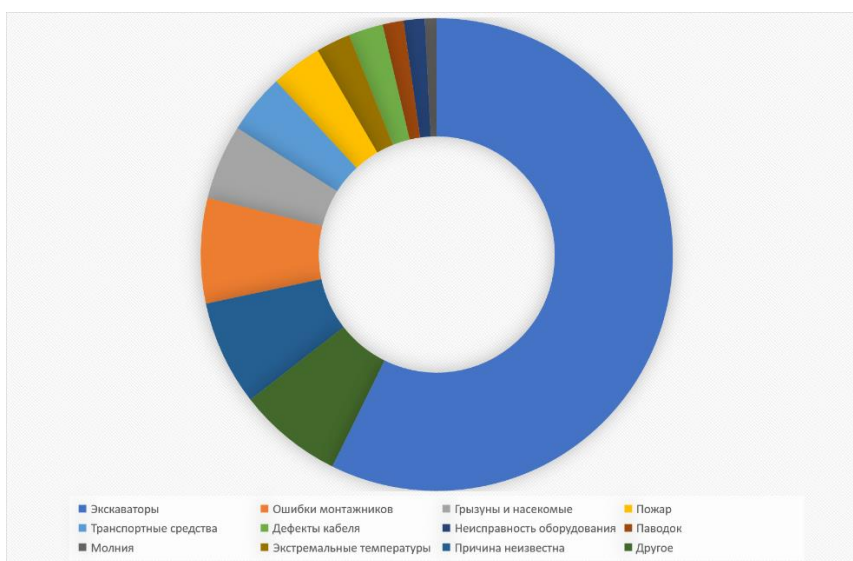


Рис. 1. Причины повреждения и простоев в работе волоконно-оптической линии связи (ВОЛС)

Большее половины причин повреждения волоконно-оптических кабелей (ВОК) (основного элемента ВОСП) занимают механические повреждения, в частности, большой урон наносят экскаваторы. Имеет место и человеческий фактор, где неквалифицированный специалист может неправильно настроить оборудование и провести некорректную работу по монтажу (сварке и укладке волокон), герметизации муфты и т.д., которые приведут к дефектам кабеля.

Природные условия также причиняют урон. Например, в 2011 году в Соединенных Штатах Америки, в штате Пенсильвания, по причине сокрушительного зимнего шторма, являющегося историческим для страны, на деревьях и кабелях возник толстый слой льда, что привело к существенным неполадкам в системе связи [5]. Если кабель подвешен над землей, то он особо уязвим к воздействию огня и влаги. От воздействия высокой температуры кабель начинает вытягиваться и, как следствие, пропадает связь. Различные конструктивные исполнения ВОК могут иметь сравнительно небольшой диаметр, поэтому кабель может быть поврежден грызунами. Важно учитывать, что у каждого кабеля есть свой срок службы и эксплуатации, который зависит от качества материала ОВ. Средний срок службы кабеля составляет 20–25 лет.



Требуется выделять средства для поддержания эффективности и повышения надежности ВОСП. Уменьшение количества аварий и поломок в кабельных сетях является одним из методов повышения надежности и снижения расходов. Особое место отводится высококвалифицированным специалистам, осуществляющим ремонт, монтаж ВОСП и их профилактику.

Можно выделить три основных класса методов обеспечения надежности ВОСП (рис. 2) [1–18]: инженерные, математические, эксплуатационные. Основные методы оценки надежности ВОСП на этапе конструирования и производства компонентов (инженерные) раскрыты в табл. 1. В таблицах 2 и 3 раскрыты особенности математических и эксплуатационных методов оценки надежности ВОСП соответственно.



Рис. 2. Классификация методов обеспечения надежности ВОСП

Таблица 1

Инженерные методы обеспечения надежности ВОСП

Метод	Характеристика метода (особенности)	Преимущества	Недостатки
1. Комплексный метод оценки	Совокупность различных видов испытаний. Испытания на нагрузки с учетом условий эксплуатации ОК. Порядок и условия осуществления проверок и список проверяемых параметров ВОК указывается в стандартах технических условий на изделие	1. Полнота данных о ходе проверки ВОК. 2. Максимальная достоверность. Комплексная оценка позволяет выявить все дефекты и повреждения, в том числе скрытые	1. Высокая стоимость испытаний. 2. Длительное проведение работ
2. Методы измерения конструктивных параметров	Проводится с целью измерения геометрических параметров ВОК. В соответствии с ГОСТ контролируются конструктивные размеры ОК	Детальная проработка локальных проблем	Строгое соблюдение всех параметров проверки
3. Методы измерения оптических характеристик	Включает расчет параметров: измерение диаметра модового поля, коэффициента хроматической дисперсии, длины волны отсечки, числовой апертуры, коэффициент затухания и т.п.	1. Высокая точность измерений. 2. Малая погрешность при расчетах	Технически сложное осуществление проверки
4. Методы испытания на стойкость к механическим воздействиям	Применение широкого спектра проверки на стойкость ВОК. Данный метод испытания проводится на стойкость и прочность к раздавливающим растягивающим усилиям, к удару, к высоким температурным изгибам, к перематыванию и другим нагрузкам	Существенное повышение надежности и эффективности ВОК	Дорогостоящее испытание



Таблица 2

Математические методы (теоретические)

Метод	Характеристика метода (особенности)	Преимущества	Недостатки
1. Коэффициент ошибок	Является универсальным для оценки и мониторинга состояния цифровой системы связи. Он рассчитывается как отношение числа битов, принятых ошибочно, к общему числу переданных битов	1. Универсальность метода оценки. 2. Измерение как для отдельных участков, так и для тракта в целом	Точность оценок вероятности ошибки уменьшается при малом общем числе переданных битов
2. Коэффициент готовности	Устанавливает и определяет вероятность того, что волоконно-оптическая система в случайный момент времени будет находиться в исправном и работоспособном состоянии: $K_{\Gamma} = \frac{T_0}{(T_0 + t_B)}$ Данная формула рассчитывается как отношение времени работы в исправном состоянии к сумме времен, складывающихся из исправной работы и вынужденных пауз в работе объекта (простой)	Имеется возможность посчитать такие параметры, как время средней наработки на отказ; среднего времени для исправления неработоспособного состояния	В результате разнообразных сред и условий эксплуатации расчет параметров будет затруднена и воспрещается пользоваться шаблоном для одного случая
3. Коэффициент вынужденного простоя	Задаёт вероятность того, что система в случайный момент времени будет находиться в неработоспособном состоянии	Коэффициент обладает всеми достоинствами и недостатками, присущими коэффициенту готовности	
4. Интенсивность отказов	Метод предназначен для расчета интенсивности. Она рассчитывается в численной форме и определяется как отношение среднего количества отказов, произошедших в течение определенного произвольного часа к величине этого временного интервала: $\xi = \frac{1}{T_0}$ В промежуток нормальной и регулярной эксплуатации интенсивность отказов постоянна	Возможность прогнозировать и проводить расчет для дальнейшей эксплуатации	При отказе хотя бы одного элемента происходит отказ всей системы

Таблица 3

Эксплуатационные методы

Метод	Характеристика метода (особенности)	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4
1. Испытания кабельной линии повышенным напряжением	Предварительно и заблаговременно к обесточенной кабельной линии применяется пятикратное постоянное напряжение. Далее выявляется электрический пробой в точке повреждения	1. Если дефект обнаружен и кабельная линия не пробита данным пятикратным напряжением, то имеется возможность заранее определить следующую дату для проведения следующего испытания и исправления проблемы, не выводя из эксплуатации линию на определенное время. 2. Во время испытаний пробой не нарушает нормальное энергоснабжение	Некоторое количество инженеров и ученых полагают, что повышение напряжения может усилить дефект, не пробив его, но позже это случится при эксплуатации



Продолжение табл. 3

1	2	3	4
2. Метод бегущей волны	Данный метод осуществляется за счет подачи напряжения отрицательной полярности от источника постоянного напряжения в кабель. При этом волновое сопротивление кабельной линии намного меньше данной величины. Так как испытательное напряжение с отрицательной полярностью, то в участке, где произошла авария, возникнут электромагнитные волны уже с положительной полярностью. В следствие этого, от точки пробоя одна волна будет распространяться в один конец кабеля, а другая – в противоположный	Обеспечивает возможность определения сложных и неустойчивых мест повреждений кабельных линий	1. Сложность анализа полученных результатов. 2. Большая погрешность измерения. 3. Невозможно стабильно провести повторения операций, что влечет за собой ошибки
3. Метод импульсного тока	Рассматривая данный метод, необходимо, чтобы выходное сопротивление импульсного генератора, который подключают к одному концу кабельной линии, было много меньше волнового сопротивления самой кабельной линии, а коэффициент отражения по току – положительным. При этом метод применяется при высокоомных замыканиях жилы на землю. Волна, которая направляется от высоковольтного генератора при достижении аварийного участка приводит к пробую. Таким образом, можно обнаружить поврежденный участок и своевременно принять меры для устранения повреждений	1. Неразрушающий метод, так как происходит кратковременное воздействие, что не ухудшает характеристики кабеля и не создает новых повреждений. 2. Высокая точность определения аварийных участков. 3. Широкая возможность применения и реализации	1. Недостаточная поставка оборудования для проведения работ. 2. Дороговизна устройства и обслуживания
4. Применение метода импульсной рефлектометрии	Для проведения метода необходимо пользоваться импульсным рефлектометром. Суть заключается в следующем: импульсные волны, распространяясь по длине кабельной линии в двух и многопроводных системах, позволяют обнаруживать локацию повреждения	1. Быстрый поиск и обнаружение дефекта	1. Невысокая точность выявления локализации неисправности. 2. Невозможность определить места появления новых трещин
5. Использование акустического метода	В результате данного способа, оператор может услышать звуковые колебания и пульсации над местом, где произошло повреждение в кабельной линии. Для локализации обрыва жилы или дефекта задействуют в основном переносной приемник ударов	1. Высокоточный метод определения локализации повреждения в кабельной линии. 2. Возможность найти несколько повреждений на одной кабельной линии	1. При малых значениях переходного сопротивления и металлических замыканиях на оболочку данный метод не может быть применен. 2. Есть вероятность возникновения пожара. Это вызвано импульсными токами. В результате их воздействия появляется искрение в местах соприкосновения с заземленными конструкциями



1	2	3	4
6. Использование индукционных средств контроля	Для проведения метода пользуются генераторами звуковой частоты и звукочастотными приемниками. С помощью данных устройств проводят поиск и определяют места пробоя между жилами и также в случаях обрыва линии с одновременным замыканием их между собой	1. Простота обнаружения повреждений	Нет возможности локализации остаточных зарядов в изоляции кабельных линий

Анализируя данные таблицы, можно утверждать, что методы обеспечения надежности ВОСП необходимы не только на проложенное ОВ, но и в процессе инженерной задумки и разработки, технического производства и прокладки в грунт.

Инженерные методы позволяют получать информацию, которая требуется для разработки и применения технических решений. Инженеры, исходя из технологической необходимости, устанавливают нормативы на расходование ресурсов в натуральном выражении. Метод применяют, если речь идет о новой продукции, новой технологии. Существенными плюсами являются: детальная проработка локальных проблем, полнота данных проверки ВОК и получение повышенной эффективности оптоволоконка.

Математические (теоретические) методы позволяют ученым и инженерам исследовать ОВ через математические модели, благодаря которым можно решить задачу обеспечения надежности и интерпретировать полученные результаты. В качестве показателей могут использоваться доли времени, в которые система находится в различных состояниях или среднее время пребывания в различных состояниях, а также некоторые комплексные показатели надежности – коэффициент готовности, коэффициент ошибок, коэффициент вынужденного простоя и интенсивность отказов. Преимуществами являются точность оценок и возможность прогнозировать и проводить расчет для дальнейшей эксплуатации.

Во время эксплуатации ВОК невозможно обойтись без эксплуатационных методов обеспечения надежности. Эксплуатационная надежность ВОСП может быть гарантирована при решении двух основных задач – обеспечения нормальных режимов работы элементов и системы в целом. Для обеспечения заданного уровня надежности необходимы грамотная техническая эксплуатация и целесообразная система ремонтов. В зависимости от поставленной цели и внешних факторов выбираются один или несколько методов, которые наиболее оптимальны и позволяют в полном объеме проанализировать и обнаружить дефекты кабельной линии.

Заключение

Оптическое волокно имеет преимущество перед другими способами передачи информации, поскольку оно создает очень малое затухание при передаче сигнала. Благодаря этому создалась возможность оптический сигнал распространить на ощутимо большее расстояние без переизлучения.

Волоконно-оптическая система передачи характеризуется такими достоинствами, как незначительная подверженность электрическим помехам, влияющим из внешней среды; пожаропрочность; электробезопасность и т.д. Вследствие этого, можно утверждать, что ВОЛС в данный момент считается одним из самых предпочитаемых видов высокоскоростной передачи информации.

Волоконно-оптические системы передачи вытесняют традиционные медно-жильные кабели связи по всей России. Создаются новые компоненты для ВОСП. Срок службы ВОСП напрямую зависит от надежности ВОК, входящего в ее состав. В процессе эксплуатации ВОСП возникает необходимость контроля состояния коммуникационных линий передачи данных. Исследованы основные причины повреждения и простоев в работе данных систем.

Проведенный анализ позволил разработать классификацию методов обеспечения надежности ВОСП. Обобщены инженерные методы (на этапе конструирования и производства компонентов ОК); математические методы, которые используются в традиционных экономических расчетах при обосновании потребностей в ресурсах, разработке плана, проектов и получение предварительных результатов годности компонентов ОК к работе, которую сверяют с ГОСТ по оценке надежности ОВ; эксплуатационные методы, которые проводятся для проложенного оптоволоконка с целью выявления повреждений.



Список литературы

1. Azadeh M. *Fiber Optics Engineering, Optical Networks*. Biswanath Mukherjee University of California. Davis, 2009. P. 1–2.
2. Варавя Н., Пронин С., Никонов М. Активные компоненты ВОЛС: надежность и проблемы выбора. Волоконно-оптические технологии // Первая миля. 2014. № 2. 58 с.
3. Konyshov V. A., Leonov A. V., Nani O. E., Treshchikov V. N., Ubaydullaev R. R. New method to obtain optimum performance for 100Gb/s multi-span fiber optic lines // *Optics Communications*. 2015. № 355. P. 279.
4. Давронбеков Д. А., Назаров А. М. Об одном из способов диагностики элементов ВОЛС систем мобильной связи // *Science and world*. 2019. Vol. I, № 6 (70). P. 18.
5. Десять возможных причин повреждения оптического кабеля. URL: <https://nag.ru/material/28375> (дата обращения: 12.10.2022).
6. Ситнов Н. Ю. Исследование методов ранней диагностики волоконно-оптических линий передачи : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.12.13. Новосибирск, 2011. 26 с.
7. ВОЛС жаждают замены. URL: <https://www.comnews.ru/content/218358/2022-01-20/2022-w03/vols-zhazhdut-zamenu> (дата обращения: 12.10.2022).
8. Элчиева М. С., Андаева З. Т., Жумабеков М. Методы повышения надежности кабельных линий // *Известия Ошского технологического университета*, 2019. № 1. С. 141–143.
9. Методы испытания волоконно-оптических кабелей. URL: <https://siblec.ru/telekommunikatsii/volokonno-opticheskie-kabeli-i-linii-svyazi/5-metody-ispytaniya-volokonno-opticheskikh-kabelej> (дата обращения: 12.10.2022).
10. Богачков И. В. Методы и средства прогнозирования эксплуатационных параметров физических каналов оптических телекоммуникационных систем : автореф. дис. ... д-ра тех. наук : 05.12.13. Омск, 2021. 44 с.
11. ГОСТ Р 59708-2021. Национальный Стандарт Российской Федерации. Волокна оптические. Методы оценки надежности. Российский институт стандартизации. М., 2021. 8 с.
12. Павлов П. П., Литвиненко Р. С. Основы теории надежности электромеханических комплексов : учеб. пособие. Казань, 2017. 18 с.
13. Ефанов В. И. Проектирование, строительство и эксплуатация ВОЛС. Томск : ТУСУР, 2012. 82 с.
14. Сунчелев И. А., Дашков В. М., Чемпинский А. В. Анализ способов определения места повреждения силовых кабелей // Самарский государственный технический университет. Электроэнергетика глазами молодежи. Т. 1. Самара, 2017. С. 213–214.
15. Испытание кабеля повышенным напряжением. URL: <https://zametkielectrika.ru/ispytanie-kabelya-povyshennym-napryazheniem/> (дата обращения: 12.10.2022).
16. Line Locating. URL: https://support.seesnake.com/line-locating/cs65_rm200_locating_line-2/ (дата обращения: 12.10.2022).
17. Метод импульсной рефлектометрии (TDR). Как найти обрыв в кабеле. URL: <https://www.ersted.ru/statii/reflektometrija/impulsnaya-reflektometriya/> (дата обращения: 12.10.2022).
18. Диагностика изоляции кабеля акустическим методом. URL: <https://test-energy.ru/akusticheskij-metod-diaagnostiki-izolyacii-kabelya/> (дата обращения: 12.10.2022).

References

1. Azadeh M. *Fiber Optics Engineering, Optical Networks*. Biswanath Mukherjee University of California. Davis, 2009:1–2.
2. Varava N., Pronin S., Nikonov M. Active components of VOLS: reliability and problems of choice. Fiber-optic technologies. *Pervaya milya = The first mile*. 2014;(2):58. (In Russ.)
3. Konyshov V.A., Leonov A.V., Nani O.E., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. New method to obtain optimum performance for 100Gb/s multi-span fiber optic lines. *Optics Communications*. 2015;(355):279.
4. Davronbekov D.A., Nazarov A.M. About one of the ways to diagnose the elements of the mobile communication systems. *Science and world*. 2019;I(6):18. (In Russ.)
5. *Desyat' vozmozhnykh prichin povrezhdeniya opticheskogo kabelya = Ten possible causes of damage to the optical cable*. (In Russ.). Available at: <https://nag.ru/material/28375> (accessed 12.10.2022).
6. Sitnov N.Yu. *Investigation of methods of early diagnosis of fiber-optic transmission lines*. PhD abstract. Novosibirsk, 2011:26. (In Russ.)
7. *VOLS zhazhdut zamenu = The VOLS are hungry for a replacement*. (In Russ.). Available at: <https://www.comnews.ru/content/218358/2022-01-20/2022-w03/vols-zhazhdut-zamenu> (accessed 12.10.2022).
8. Elchieva M.S., Andaeva Z.T., Zhumabekov M. Methods for improving the reliability of cable lines. *Izvestiya Oshskogo tekhnologicheskogo universiteta = Proceedings of the Osh University of Technology*. 2019;(1):141–143. (In Russ.)
9. *Metody ispytaniya volokonno-opticheskikh kabelej = Methods of testing fiber optic cables*. (In Russ.). Available at: <https://siblec.ru/telekommunikatsii/volokonno-opticheskie-kabeli-i-linii-svyazi/5-metody-ispytaniya-volokonno-opticheskikh-kabelej> (accessed 12.10.2022).
10. Bogachkov I.V. *Methods and tools for predicting the operational parameters of physical channels of optical telecommunication systems*. DSc abstract. Omsk, 2021:44. (In Russ.)



11. GOST R 59708-2021. *Natsional'nyy Standart Rossiyskoy Federatsii. Volokna opticheskie. Metody otsenki nadezhnosti. Rossiyskiy institut standartizatsii = The National Standard of the Russian Federation. Optical fibers. Methods of reliability assessment. Russian Institute of Standardization. Moscow, 2021:8. (In Russ.)*
12. Pavlov P.P., Litvinenko R.S. *Osnovy teorii nadezhnosti elektromekhanicheskikh kompleksov: ucheb. posobie = Fundamentals of the theory of reliability of electromechanical complexes. Kazan, 2017:18. (In Russ.)*
13. Efanov V.I. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya VOLS = Design, construction and operation of the fiber optic network. Tomsk: TUSUR, 2012:82. (In Russ.)*
14. Suncheleev I.A., Dashkov V.M., Chempinskiy A.V. Analysis of methods for determining the location of damage to power cables. *Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. Elektroenergetika glazami molodezhi. T. 1 = Samara State Technical University. Electric power industry through the eyes of young people. Vol. 1. Samara, 2017:213–214. (In Russ.)*
15. *Ispytanie kabelya povyshennym napryazheniem = High voltage cable testing. (In Russ.). Available at: <https://zametki-electrika.ru/ispytanie-kabelya-povyshennym-napryazheniem/> (accessed 12.10.2022).*
16. *Line Locating. Available at: https://support.seesnake.com/line-locating/cs65_rm200_locating_line-2/ (accessed 12.10.2022).*
17. *Metod impul'snoy reflektometrii (TDR). Kak nayti obryv v kabele. = The method of pulse reflectometry (TDR). How to find a break in the cable (In Russ.). Available at: <https://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/impulsnaya-reflektometriya/> (accessed 12.10.2022).*
18. *Diagnostika izolyatsii kabelya akusticheskim metodom = Diagnostics of cable insulation by acoustic method. (In Russ.). Available at: <https://test-energy.ru/akusticheskij-metod-diagnosticski-izolyatsii-kabelya/> (accessed 12.10.2022).*

Поступила в редакцию / Received 14.06.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 16.07.2023

Принята к публикации / Accepted 30.07.2023