



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ СО ВСТРОЕННЫМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНОМ

INNOVATIVE TECHNICAL SOLUTIONS FOR CABLES WITH INTEGRATED OPTICAL FIBER

A.Yu. Beskorovainy, Director for Technology and Development, Ltd. "Plant TATKABEL";
D.Y. Kharitonova, Lead Engineer for technical support, Ltd. "Plant TATKABEL"

А.Ю. Бескоровайный, директор по технологиям и развитию, ООО «Завод ТАТКАБЕЛЬ»;
Д.Ю. Харитонов, ведущий инженер по техническому сопровождению, ООО «Завод ТАТКАБЕЛЬ»

Аннотация. Статья посвящена анализу проблем выхода из строя оптического волокна в высоковольтных кабелях, используемого для систем мониторинга температуры. Статья подготовлена на основе доклада заседания секции «Кабели и провода энергетического назначения» Ассоциации «Электрокабель», которая проходила на ООО «Завод «ТАТКАБЕЛЬ».

Ключевые слова: оптическое волокно, кабельные линии на высокое напряжение, вращение кабеля во время прокладки, перегиб или излом оптического волокна

Abstract. The article is devoted to the analysis of the problems of failure of optical fiber in high-voltage cables used for temperature monitoring systems. The article was prepared on the basis of the report of the meeting of the section "Cables and wires for energy purposes" of the Electrocable Association, which was held at the Ltd. "Plant TATKABEL".

Key words: optical fiber, high voltage cable lines, cable rotation during installation, bending or breaking of optical fiber

Материал поступил в редакцию 06.09.2024

Автор, ответственный за переписку: А.Ю. Бескоровайный

E-mail: office-ztk@zavod-tatcable.ru

Всё чаще в России при строительстве новых кабельных линий (КЛ) высокого напряжения 110–500 кВ используют систему мониторинга температуры токопроводящей жилы. Необходимость использования данной системы обусловлена нередкими ошибками при проектировании и протяжке кабельных линий, такими как:

- выбор сечения жилы кабеля на стадии проектирования без учёта всех аспектов влияния условий прокладки на нагрев жилы кабеля и, как результат, неверный выбор сечения жилы кабеля;
- неправильная эксплуатация кабеля в связи с неверно подобранным режимом сети;
- повреждение защитных оболочек кабеля при его протяжке на объектах.

Данные упущения в дальнейшем могут привести к перегреву кабеля, работающего под напряжением, и скорому выходу из строя кабельных линий, что приводит к большим финансовым затратам и опасности порчи объектов электроэнергетики. В связи с этим система, осуществляющая контроль температуры нагрева жилы кабелей по всей протяженности КЛ, получила широкое распространение на объектах электросетевого хозяйства. Для этого заводы изготавливают кабели высокого напряжения со встроенными оптическими модулями, которые служат датчиками для определения температуры нагрева кабеля в системе мониторинга.

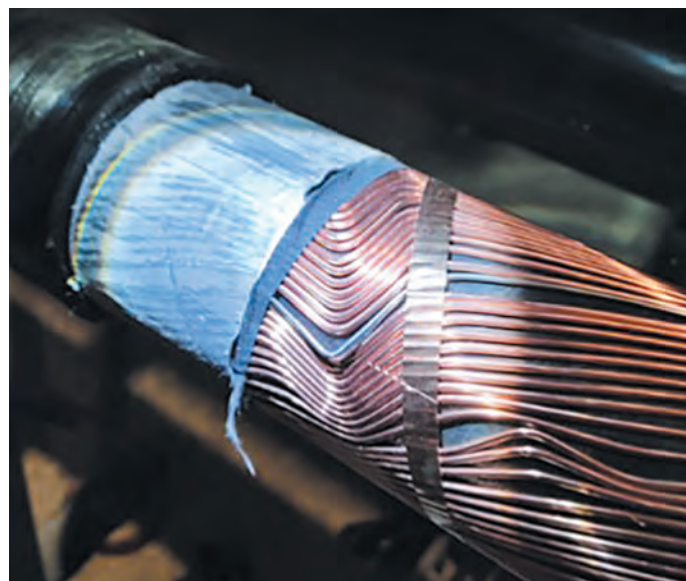
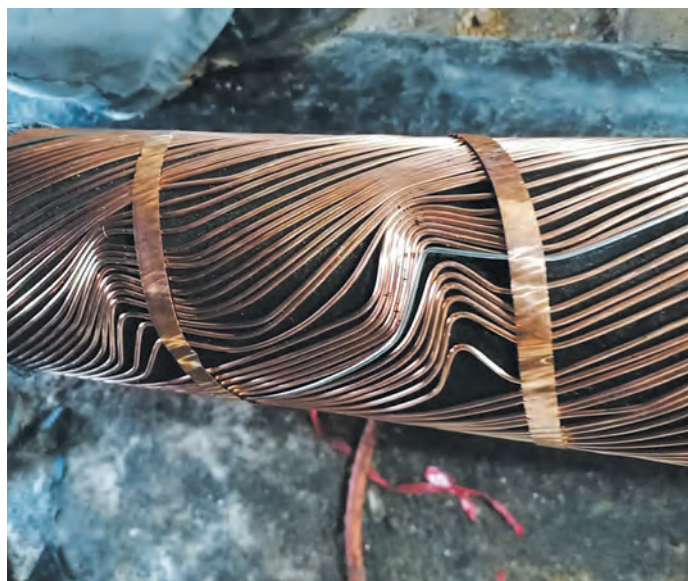


Рис. 1. Деформации оптического модуля. Смещение проволок экрана деформирует стальную трубку с оптическим волокном, что создаёт локальное затухание

На практике при прокладке данных высоковольтных кабелей на объектах в процессе протяжки наблюдаются частые случаи повреждения оптического модуля и, как следствие, перегиб или излом оптического волокна.

Вследствие такой деформации оптического волокна наблюдается затухание сигнала больше нормативного значения, равного 0,5 дБ/км (фактические значения при таких дефектах от 0,6 до 2,5 дБ/км).

ООО «Завод ТАТКАБЕЛЬ», как завод-изготовитель кабельной продукции, заинтересован в качестве и стабильной работе своей продукции, в связи с чем провёл научно-исследовательскую работу по данной проблематике. Во внимание принимались кабели высокого напряжения 110–500 кВ с сегментированными токопроводящими жилами типа «Milliken» сечением 1000–2500 мм² с изоляцией из сшитого полиэтилена, с медным экраном, со встроенными стальными модулями с четырьмя многомодовыми оптическими волокнами.

КОРРЕЛЯЦИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И МОДУЛЯ

Первая часть исследования заключалась в анализе накопленных статистических данных повышенных затуханий оптического волокна после протяжки высоковольтного кабеля в рамках реализованных проектов 2014–2023 гг. Рассматривалась зависимость от следующих факторов:

- расстояние между проволоками;
- кратность шага скрутки экрана;
- номинальное напряжение кабеля;

- температура воздуха при прокладке;
- сечение жилы и экрана кабеля;
- сложность трассы (количество поворотов, их направление, градусы углов входа в горизонтально-направленное бурение (ГНБ) и их количество, применение толкателей или вспомогательных лебёдок, число, глубина и длина ГНБ, спуски или подъёмы трасс);
- усилие протяжки;
- масса кабеля;
- отношение усилия протяжки к массе кабеля.

По результатам собранной статистики сделаны следующие выводы о факторах, которые с большей степенью вероятности влияют на появление дефектов оптического волокна:

1. Большее количество строительных длин кабеля с дефектом оптического волокна наблюдается у кабелей, в которых расстояние между проволоками экрана более 1,7 мм.

2. Наибольшее количество строительных длин с дефектом возникало у кабеля максимального сечения жилы 2500 мм².

3. На кабеле с напряжением 220 кВ процент повышенных затуханий больше, чем на кабеле с напряжением 110 кВ. Единственное отличие 110 кВ от 220 кВ – большая толщина изоляции (рычаг/плечо до экрана от жилы), а увеличение рычага экрана способствует осевому закручиванию.

4. Увеличение процента дефектных длин кабеля наблюдается при понижении температуры окружающего воздуха при прокладке кабеля. Данный аспект связан с возможным неравномерным прогреванием кабеля (при температуре воздуха ниже минус 5 °С барабаны с кабелем перед прокладкой прогревают) или

резком охлаждении поверхности, которые могут оказывать негативное влияние на механику экрана.

ЭФФЕКТ ОСЕВОГО ЗАКРУЧИВАНИЯ (КРУЧЕНИЯ) КАБЕЛЯ ВО ВРЕМЯ ПРОКЛАДКИ

Вторая часть исследований заключалась в наблюдении за поведением кабеля во время прокладки, отслеживались повороты кабеля вокруг своей оси и деформации оболочки после прохождения блоков роликов. В результате наблюдений выявлено, что:

- осевое закручивание кабеля при протяжке присутствует всегда;
- направление закручивания может быть и по, и против направления поворота экрана;
- интенсивность закручивания и его направление по ходу прокладки изменяется;
- обнаружен предел кручения, при котором происходит излом оптического модуля: это 2,5 оборота на 100 м и выше при кручении против направления экрана;
- осевое закручивание кабеля обуславливается как внутренним напряжением кабеля, так и факторами, обусловленными условиями прокладки;
- на трассах с наличием продолжительных участков труб, проложенных методом ГНБ, и на прямолинейных трассах кручение происходит интенсивнее;
- трассы с большими перепадами высот в сочетании с поворотами являются наиболее предрасположенными к появлению кручения;
- трассы с предельными значениями усилий протяжки более 4 т увеличивают вероятность появления дефектов оптического волокна.

Негативное влияние осевого закручивания кабеля при его протяжке заключается в том, что при кручении экран кабеля стремится раскрутиться, но так как он «заперт» между изолированной жилой и оболочкой, избыток длины проволоки компенсируется изломами (рис. 1).

Принимая в расчёт данные, полученные по «Корреляции появления дефектов оптического волокна и модуля» и «Эффекта осевого закручивания (кручения) кабеля во время прокладки» (см. выше), решение задачи разделилось на два направления:

- устранение напряжённости кабеля во время производства;
- устранение эффекта кручения кабеля при прокладке путём изменения условий протяжки кабеля.

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОЯВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ КАБЕЛЯ ВО ВРЕМЯ ПРОИЗВОДСТВА

В ходе эмпирических исследований, а именно измерений количества оборотов кабеля на единицу

его длины, было определено, что на стадии производства в кабеле происходит накопление напряжённости.

Это происходит из-за следующих факторов:

- наличие механического напряжения в сегментированных токопроводящих жилах типа «Milliken» сечением 1000–2500 мм², возникающего при скрутке жил;
- компенсация или гиперкомпенсация напряжения в жиле при изолировании путём подкручивания кабеля (использование подкручивающего устройства Twister);
- противодействие усилиям осевого закручивания заготовки при наложении экранов на линии типа Drum-twister. Направляющие ролики, калибры и непосредственно проволоки экрана оказывают тормозящий момент на изолированную заготовку, тем самым создавая паразитное закручивание кабеля.

Перечисленные технологические факторы при производстве приводят к тому, что кабель не имеет сбалансированного состояния, а имеет потенциальную энергию (механическую напряжённость), которая приводит к кручению кабеля во время прокладки.

АНАЛИЗ ПРИЧИН ОСЕВОГО ЗАКРУЧИВАНИЯ (КРУЧЕНИЯ) КАБЕЛЯ ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОКЛАДКОЙ

Основной причиной осевого закручивания кабеля во время прокладки является спиральное направление его движения. Такой эффект наблюдается в результате отклонения кабеля от его горизонтальной оси вверх и вниз при движении кабеля по блокам роликов. В данном случае кабелю,двигающемуся по блокам роликов, расположенных на разной высоте, задаётся закручивающее движение. Данный закручивающий эффект проявляется сильнее при больших значениях:

- перепада высоты между первым и последним роликом в блоке;
- усилия протяжки и, как следствие, бокового усилия;
- диаметра кабеля;
- коэффициента трения между роликом и кабелем.

АПРОБИРОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ПРАКТИКЕ

Создание искусственных ограничителей кручению. Первая стратегия к разрешению проблемы осевого закручивания при протяжке заключалась в создании искусственных ограничителей кручению. В данном случае были спроектированы и изготовлены блоки роликов, в которых кабель проходил изгибаясь,

при этом создавалось сжимающее усилие, препятствующее кручению. Количество блоков выбиралось из правила 1 блок на 50 метров на прямолинейных участках.

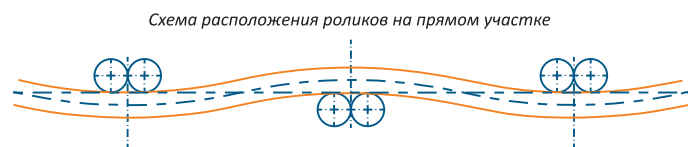


Рис. 2. Схема расположения роликов «змейкой»



Рис. 3. Расположение роликов "змейкой" при протяжке кабеля

Однако практика прокладки кабеля вышеуказанным способом существенного эффекта не принесла, так как напряжённость в кабеле постепенно увеличивалась от блока к блоку и в итоге снова приводила к кручению.

Создание искусственного кручения во время прокладки. Второй подход возможного решения заключался в установке блоков роликов, которые принудительно закручивают кабель в сторону закрутки экрана (рис. 4).

Суть данного метода заключалась в прохождении кабеля через блок роликов в виде змейки (аналогично «Созданию искусственных ограничителей кручению» – см. выше), но в котором пары роликов располагались под определённым углом к кабелю, тем самым придавая кручение.

Данный способ позволил остановить кручение и даже придать кабелю осевое закручивание в другую сторону, но в то же самое время это привело к противоположному эффекту на других участках трассы до установки данных роликов.



Рис. 4. Установка блоков роликов

ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕШЕНИЯ, ПРИМЕНЁННЫЕ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

Компенсация напряжения в заводских условиях, технология PRE-Twist. Для понимания влияния самого кабеля на его кручение при прокладке была проведена работа по искусственному созданию напряжённости, направленной в противоположную сторону от экрана. Таким образом, кабель должен закручиваться в сторону закручивания экрана.

Для этого была разработана и внедрена технология PRE-Twist при экранировании на машине Drumtwister. Суть технологии в запаздывании вращения отдатчика по отношению к приёмнику при наложении экрана.

Эксперимент проводился на кабеле марки ПвП(п)у2гж 1х2500/265 ОБММ2х4-127/220 кВ строительной длиной 450 м. Значение PRE-Twist составило 1 оборот на 50 м. Далее кабель был подвергнут имитации прокладки по прямой трассе с поворотом на 180°. Эксперимент показал следующие результаты:

- до поворотного блока 168 м кабель закрутился на 200° в сторону закрутки экрана;
- после блока кабель начал закручиваться в противоположную сторону и на протяжении 90 м закрутился на 70° против экрана;
- далее кручение медленно возобновилось в необходимую сторону.

На основании данных результатов были сделаны выводы:

- PRE-Twist кабеля оказывает положительный эффект в части закручивания кабеля в сторону затягивания экрана при прокладке;



Рис. 5. Проведение эксперимента PRE-Twist кабеля

- при этом сильного кручения кабеля не наблюдается, что свидетельствует о том, что PRE-Twist делает кабель более сбалансированным;
- блок роликов оказывает противоположный эффект, кабель после них закручивался в сторону против экрана.

Данный эксперимент позволил сделать следующие выводы:

- PRE-Twist оказывает положительный эффект;
- значение PRE-Twist должно только компенсировать накопленную напряжённость для создания суммарной напряжённости равной нулю.

Защита оптического волокна в кабеле проволоками экрана увеличенного диаметра. Конструкция высоковольтного кабеля с включением в медный экран проволок увеличенного диаметра, которые располагаются смежно с оптическими модулями, показана на рис. 6.

Стратегия заключается в увеличении жесткости медного экрана, уменьшении поперечного воздействия на оптический модуль.

Реальный опыт применения данной конструкции кабеля показал, что количество повреждений оптического модуля не уменьшилось, данный подход не увеличил сопротивление кабеля изломам оптического модуля.

Защита оптического волокна путём армирования стеклопластиковыми прутками в общей полиэтиленовой оболочке (рис. 7). Стратегия заключается в уменьшении поперечного воздействия на оптическое волокно при помощи конструкции защищённого оптического волокна, где в качестве армирующих элементов выступает стеклопластиковый прутки диаметром 1,8 мм, а оптическое волокно находится между прутками в стальной трубке.

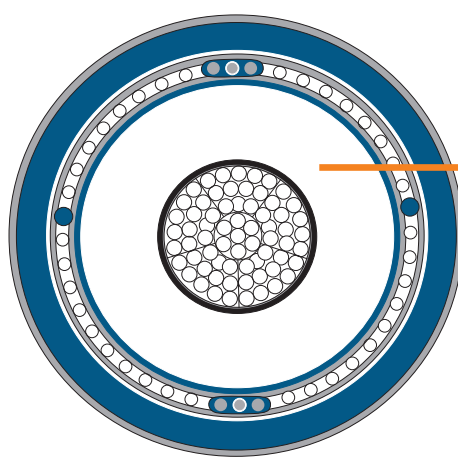
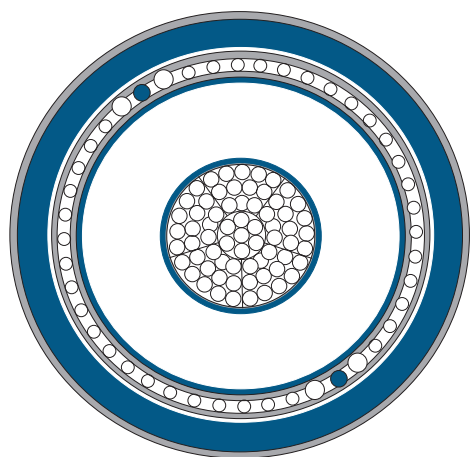


Рис. 6. Кабель с включением в медный экран проволок увеличенного диаметра

Рис. 7. Кабель с включением в медный экран плоского оптического кабеля. Конструкция плоского оптического кабеля



Рис. 8. Изломы плоского ОВ

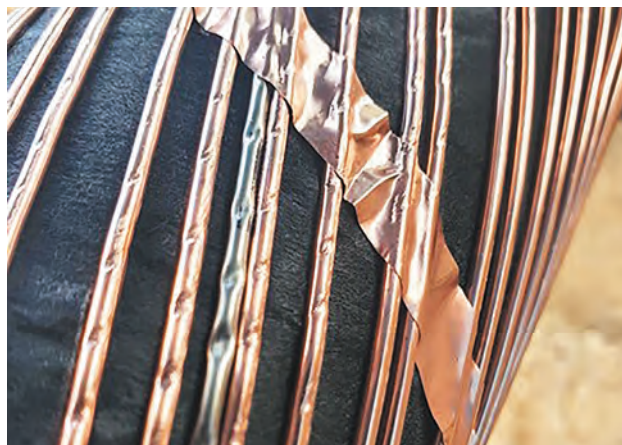


Рис. 9. Кабель с двойным медным экраном. Повреждение проволок медного экрана и оптического модуля

Реальный опыт применения данной конструкции кабеля показал:

- при искусственном закручивании кабеля на обороты, сопоставимые при прокладке один оборот на 40 м, были зафиксированы превышения нормированного значения коэффициента затухания оптического волокна;
- в процессе снятия оболочки были обнаружены места с изломами плоского оптического кабеля (рис. 8).

Защита оптоволоконного модуля путём наложения экрана в два прохода. Стратегия заключается в повышении сопротивляемости кабеля осевому закручиванию в любую сторону.

Реальный опыт применения данной конструкции кабеля показал, что после прокладки на сложной трассе в данной конструкции кабеля обнаружены изгибы проволок экрана (верхний экран слегка волнистый), сдавливание оптического модуля, также есть следы продавливания на изоляции (рис. 9), превышения нормированного значения коэффициента затухания оптического волокна.

Защита оптического модуля, бронированного стальными проволоками (рис. 10). Стратегия заключается в увеличении стойкости бронированного оптического модуля к изгибам и растягивающим усилиям.

Реальный опыт применения данной конструкции кабеля показал, что после перемотки с повышенным натяжением и созданием экстремальных изгибов значения затухания многомодового волокна в пределах 0,506–0,550 дБ/км (длина волны 1300 нм). Выявлена сложность при расчёте экранов небольшого сечения из-за большого диаметра бронированного оптического модуля.

Конструкция высоковольтного кабеля с заполнением междупроволочного пространства медного экрана полимерными жгутами (рис. 11). Стратегия заключается в исключении возможности изломов оптического модуля путём заполнения всего пространства в экране, повышении устойчивости кабеля к кручению.

Реальный опыт применения данной конструкции кабеля показал,

что данная мера в совокупности с PRE-Twist на данный момент используется на ООО «Завод ТАТКАБЕЛЬ» при изготовлении высоковольтных кабелей со встроенными оптическими модулями. В течение года отклонений значений коэффициента затухания оптического волокна от нормированного значения не обнаружено.

ВЫВОДЫ

В результате проведённых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на ООО «Завод ТАТКАБЕЛЬ» разработаны следующие решения для исключения повреждений встроенного оптического волокна при протяжке кабеля:

1. При подготовке трассы кабельных линий на объектах необходимо обеспечивать проектные условия трасс согласно проекту производства работ (ППР), согласованному с заводом-изготовителем кабельной продукции, в том числе правильность расстановки

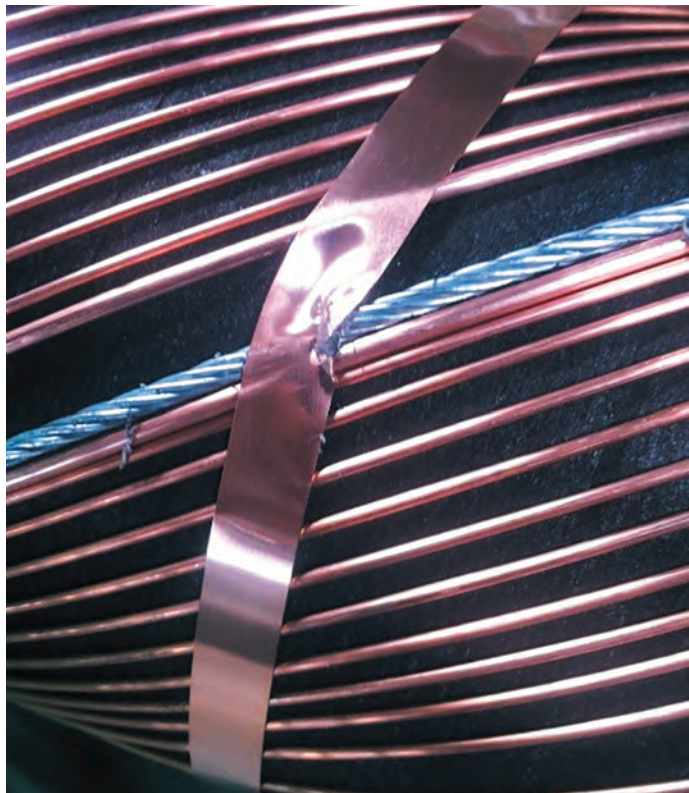


Рис. 10. Оптический модуль, бронированный стальными проволоками



Рис. 11. Медный экран с полиэтиленовыми жгутами между проволоками

блоков роликов; установки необходимого количества роликов, рассчитанного исходя из боковых усилий тяжения; применения дополнительного оборудования для уменьшения усилий тяжения (толкатели); исключения спусков и подъёмов кабелей под 90°.

2. На стадии производства необходимо обеспечить изготовление механически сбалансированного кабеля (технология PRE-Twist).

3. В кабелях со встроенным оптическим модулем необходимо применять конструкцию экрана с заполнением пустот между его проволоками (конструкция кабеля со сплошным экраном). В дальнейшем рассмотреть замену медных проволок на плакированный алюминиевый сплав.

На объектах воздействия данных факторов можно избежать, если:

- учитывать расположение блоков роликов без перепада высоты при согласовании заводом-изготовителем кабельной продукции проекта производства работ по прокладке кабельных линий;
- детально проводить приёмку трассы шеф-инженерами, измерения радиусов блоков роликов, опорных конструкций, работоспособность роликов, использование стеклопластиковых прутков в качестве шаблона;
- применять кабельные толкатели и избегать подтяжки второй лебёдкой при протяжке кабеля на трассах.

ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

Стоимость подписки на I полугодие 2025 года (3 номера):

- для членов Ассоциации «Электрокабель» — 2850 руб.;
- для остальных подписчиков России — 3000 руб.

НДС не облагается по ст. 145 НК РФ

По вопросам подписки: Алла Тимофеева
Тел./факс: +7 (495) 918-16-27 E-mail: kp@vniikp.ru

Реквизиты для оплаты в рублях:

ООО «Журнал «Кабели и Провода»
ИНН 7722159427
р/с 40702810238120102932
в Московском банке ПАО СБЕРБАНК, г. Москва
к/с 30101810400000000225
БИК 044525225

Подписной индекс в каталоге
агентства «Урал-Пресс» — **79943**