

С. Кри, Е. Кьелквист, Dow Europe GmbH, Хорген, Швейцария
М.Ю. Шувалов, д-р техн. наук, заведующий отделением –
директор научного направления;
В.Л. Овсиенко, канд. техн. наук, заведующий лабораторией;
Д.В. Колосков, научный сотрудник;
 ОАО «ВНИИКП»

Электрическая прочность и развитие водных триингов в образцах миниатюрных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с различным содержанием добавки, препятствующей развитию триингов

Феномен водных триингов

Влага, проникающая в изоляцию кабелей среднего напряжения является одним из основных факторов, способствующих снижению электрической прочности этих кабелей с течением времени [1, 2, 3]. Причина такого ухудшения надежности заключается в развитии водных триингов (ВТ). Триинги возникают в результате совместного воздействия воды, микродефектов и электрического напряжения на изоляцию. Они представляют собой окисленные участки диэлектрика, содержащие микроскопические и субмикроскопические пустоты [4], заполненные водой.

В реальных условиях ВТ растут сравнительно медленно, зарождаясь на дефектах, вокруг которых напряженность электрического поля увеличена (иные включения, полости, выступы электропроводящего экрана в изоляцию [5]). Доказано, что скорость развития ВТ зависит от целого ряда факторов, например от частоты и напряженности поля, от температуры, от морфологии изоляции, от типа «загрязняющих» ионов и их концентрации [6, 7, 8, 9]. На рис. 1 показаны примеры триингов типа «веер», рост которых начинается от поверхности раздела между

изоляцией и электропроводящим экраном, и триингов типа «бант», возникновение которых инициируется дефектами в изоляции.

В данной статье представлены результаты исследования пяти групп мини-кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), отличающихся количественной концентрацией добавки, препятствующей развитию ВТ. Основная задача исследования заключалась в определении электрической прочности и степени развития ВТ в образцах, подвергнутых ускоренному старению во влажных условиях на протяжении 1000 ч, и зависимости этих показателей от содержания добавки. Это позволит продемонстрировать важность оптимизации содержания добавки, используемой с целью поддержания надежности кабеля при «влажном старении».

Экспериментальная часть

Практика испытаний мини-кабелей в настоящее время широко распространена в мире. Изготовление небольших моделей кабелей и их последующие испытания позволяют получить ценные экспериментальные данные при сниженных

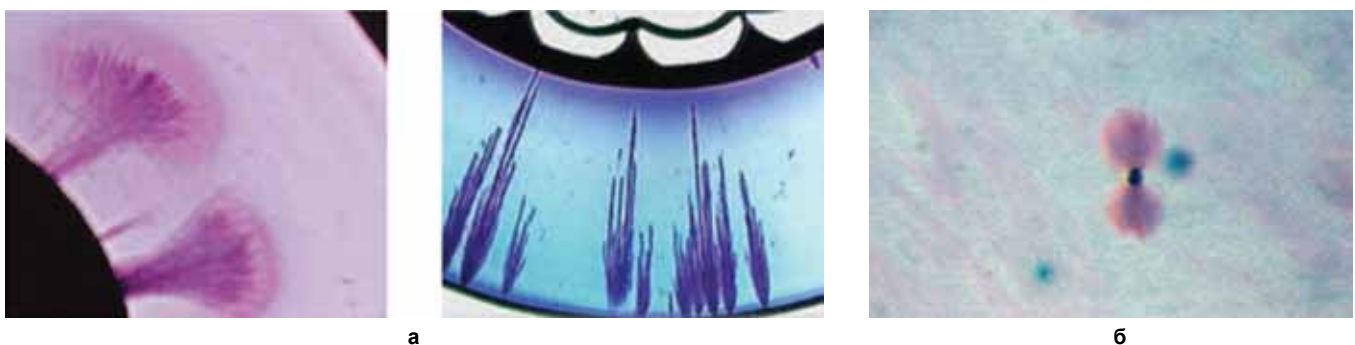


Рис. 1. Примеры развития триингов типа «веер» (а) и триингов типа «бант» (б) в изоляции из сшитого полиэтилена

Таблица 1

Материалы, использованные при изготовлении мини-кабелей

№ образца мини-кабеля	Содержание добавки, препятствующей развитию триингов	Электропроводящие экраны по жиле и изоляции
1	Нулевое	Сополимерная система с добавлением сажи
2	Малое	То же
3	Среднее	То же
4	Оптимальное	То же
5	Оптимальное	Улучшенный электропроводящий компаунд

затратах. Кроме того, использование мини-кабелей ведет к значительному удешевлению самой процедуры испытаний и сокращению ее продолжительности.

Краткая характеристика материалов, использованных в составе исследованных мини-кабелей, представлена в табл. 1.

Модели кабелей были изготовлены с использованием технологии тройной экструзии. Конструкция включает следующие элементы: токопроводящая жила диаметром 1,4 мм (луженая медь), экструдированный экран по жиле толщиной 0,7 мм, изоляция толщиной 1,5 мм, экран по изоляции толщиной 0,15 мм. Вулканизация выполнена в паровой среде при давлении 15 атм. До начала опытов по старению во влажных условиях образцы в течение 16 ч выдерживались в воздушной среде при температуре 90 °С с тем, чтобы обеспечить дегазацию кабелей. Старение осуществлялось в течение 1000 ч с использованием деминерализованной воды при температуре 85 °С (со стороны жилы) и водопроводной воды при температуре 70 °С (с внешней стороны мини-кабеля).

Максимальная напряженность электрического поля при испытаниях составила 9 кВ/мм, средняя напряженность – 6 кВ/мм. Испытания на пробой проводились при комнатной температуре, частоте 50 Гц и скорости подъема напряжения 2 кВ/с. Полученные значения электрической прочности оценивались с применением распределения Вейбулла.

С целью оценки скорости развития ВТ от каждого образца мини-кабеля отбирались пробы – срезы толщиной 300 мкм. При этом в дальнейшей работе использовалась только половина таких проб, отобранных «через одну» – с тем, чтобы свести к минимуму «двойной» подсчет и повторную оценку одних и тех же триингов. 150 проб с каждого образца мини-кабеля окрашивались метиленовым синим и затем исследовались под микроскопом. Во всех пробах измерялась максимальная длина триингов типа «бант», а также триингов типа «квеер», выросших на границе с обоими электропроводящими экранами. При определении концентрации триингов в пробе подсчитывались те из них, длина которых превышала 50 мкм.

Результаты и их обсуждение

В табл. 2 приведены результаты определения электрической прочности образцов мини-кабелей – до старения и после старения в течение 1000 ч во влажных условиях.

Как видно из табл. 2, все 5 групп образцов до старения имели электрическую прочность, близкую к 100 кВ/мм. Более тщательный анализ позволяет выявить примерно

15 %-ое различие между величинами напряжения пробоя у образцов разных мини-кабелей. Наивысшими эти значения оказались у тех образцов, которые либо вовсе не содержали антитриинговой добавки, либо содержали ее в малом количестве. Этот эффект наблюдался и в более ранних исследованиях; предположительно он объясняется большей склонностью кабелей с добавками в изоляции к тепловому пробоям. Предполагается, что это обусловлено комбинированным влиянием полярных добавок и полярных

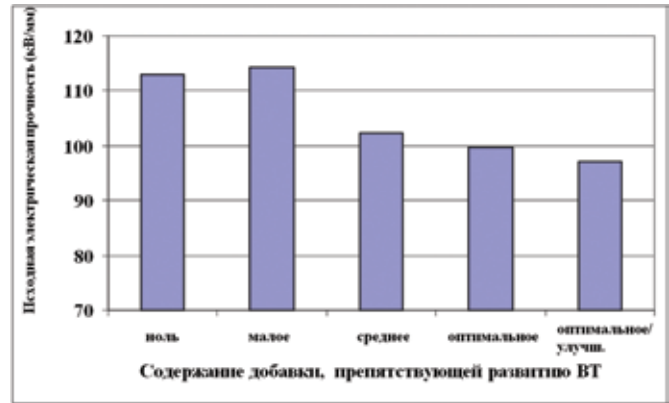


Рис. 2. Исходная электрическая прочность образцов мини-кабелей как функция содержания добавки, препятствующей развитию ВТ.

Примечание: «улучш.» означает улучшенный электропроводящий компаунд

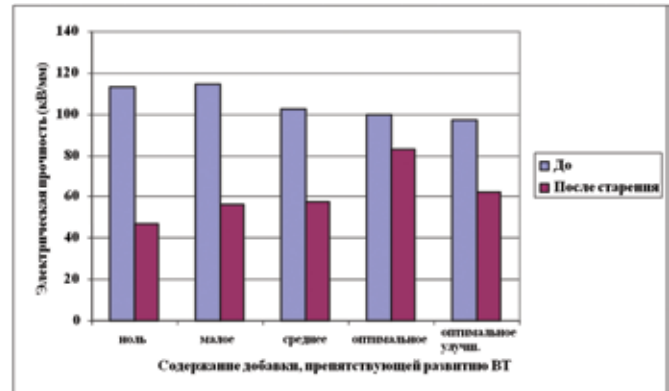


Рис. 3. Сравнение электрической прочности образцов мини-кабелей до и после старения во влажных условиях.

Примечание: «улучш.» означает улучшенный электропроводящий компаунд

Таблица 2

Электрическая прочность образцов мини-кабелей до и после старения

Номер образца мини-кабеля	Содержание добавки, препятствующей развитию триингов	Экраны по жиле и изоляции	Электрическая прочность*, E_0 кВ/мм; b		Снижение электрической прочности, %
			до старения	после старения	
1	Нулевое	Сополимерная система с добавлением сажи	113; 13	47; 9	58,4
2	Малое	То же	114; 10	56; 7	51,0
3	Среднее	То же	102; 10	58; 6	43,5
4	Оптимальное	То же	100; 7	83; 5	16,4
5	Оптимальное	Улучшенный электропроводящий компаунд	97; 7	62; 22	35,9

* E_0 – параметр масштаба, b – параметр формы распределения Вейбулла

побочных продуктов вулканизации. Считается, что побочные продукты вулканизации лучше растворяются в тех системах, которые включают антитриинговые добавки.

На рис. 2 графически представлены величины исходной электрической прочности мини-кабелей для образцов с различным содержанием добавки.

Как и предполагалось, после старения во влажных условиях при повышенной температуре электрическая прочность всех 5 образцов снизилась. Это снижение наглядно отображено на рис. 3.

Наблюдавшееся до старения ранжирование образцов по уровню электрической прочности после старения кардинально изменилось. А именно, **после 1000 ч старения во влажных условиях при повышенной температуре электрическая прочность оказалась тем выше, чем выше содержание добавки.** Однако в связи с ограниченной растворимостью антитриинговой добавки в СПЭ не представляется возможным просто увеличивать ее концентрацию с целью повышения электрической прочности кабеля при старении во влажных условиях, то есть существует определенная оптимальная концентрация данной добавки, необходимая для минимизации снижения электрической прочности при старении кабеля во влажных условиях при повышенной температуре. Причина такого эффекта, надо полагать, состоит в замедлении развития ВТ в изоляции из СПЭ. Между тем известно, что появление ВТ служит предпосылкой для возникновения электрических триингов, которые являются непосредственной причиной отказов кабелей. Можно предположить, что количество триингов типа «бант» зависит от степени чистоты изоляции, а количество триингов типа «веер» – от гладкости границы раздела между изоляцией и электропроводящим экраном. При этом мы предполагаем, что введение антитриинговой добавки в состав изолирующего слоя препятствует образованию триингов как типа «веер», так и типа «бант».

Мы выполнили обследование образцов состаренных мини-кабелей с целью количественного анализа триингов типа «веер», растущих от внутреннего электропроводящего экрана, триингов типа «бант» и триингов типа «веер», развивающихся от электропроводящего экрана по изоляции.

К сожалению, в нашем распоряжении было недостаточно материала для подробного изучения ВТ в образце № 4, и поэтому для анализа были взяты образцы под номерами 1, 2, 3 и 5. В табл. 3 собраны и обобщены данные по концентрации триингов, а также данные о длинах триингов типа «веер» и триингов типа «бант» для этих четырех образцов.

Сведения о концентрации ВТ, содержащиеся в табл. 3, графическим образом представлены на рис. 4. Очевидно, что образец № 5 (экран которого изготовлен из улучшенного электропроводящего компаунда) характеризуется гораздо меньшим содержанием триингов типа «веер», растущих от экрана по жиле, что предполагает значительно более низкий уровень дефектов и неровностей на границе раздела между изоляцией и экраном. Что касается трех остальных образцов, изготовленных с применением стандартной электропроводящей композиции, то здесь наблюдается значительный разброс по концентрации триингов типа «веер», растущих от экрана по жиле. Как видно из рис. 4, количество триингов типа «веер», растущих от экрана по изоляции, во всех образцах оказалось очень незначительным. Низкая величина напряженности электрического поля у наружного электропроводящего экрана либо вообще не приводит к возникновению триингов в данной области,

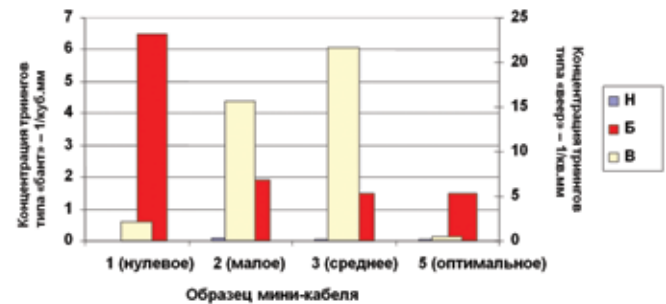


Рис. 4. Обобщенные данные о концентрации водных триингов в четырех образцах мини-кабелей: Б – концентрация триингов типа «бант» – 1/мм²; Н – концентрация триингов типа «веер» – 1/мм², растущих от наружного (Н) экрана; В – концентрация триингов типа «веер» – 1/мм², растущих от внутреннего (В) экрана

Таблица 3

Обобщенные данные о концентрации и размерах водных триингов в образцах мини-кабелей

Вид триинга	№ образца мини-кабеля	1	2	3	5
	Содержание добавки, препятствующей развитию триингов	Нулевое	Малое	Среднее	Оптимальное
	Электропроводящие экраны	Сополимерная система с добавлением сажи	Сополимерная система с добавлением сажи	Сополимерная система с добавлением сажи	Улучшенный электропроводящий компаунд
Триинги типа «бант»	Макс. длина, мкм	750	625	800	450
	Средн. длина, мкм	136	168	207	146
	Ср.-кв. откл., мкм	80	92	126	65
	Концентрация, 1/мм³	6,5	1,9	1,5	1,5
Триинги типа «веер», выросшие от экрана по жиле	Макс. длина, мкм	1050	600	650	150
	Средн. длина, мкм	632	406	460	53
	Ср.-кв. откл., мкм	129	59	64	28
	Концентрация, 1/мм²	2,1	15,7	21,7	0,4
Триинги типа «веер», выросшие от экрана по изоляции	Макс. длина, мкм	50	175	325	75
	Средн. длина, мкм	33	42	48	37
	Ср.-кв. откл., мкм	12	25	53	15
	Концентрация, 1/мм²	0,001	0,091	0,039	0,052

либо способствует их появлению в малых количествах (при длительных испытаниях).

Что касается концентрации триингов типа «бант», то ее значения у трех образцов, содержащих антитриинговую добавку, по существу не слишком сильно различаются между собой (рис. 4). Отдельно стоит образец № 1 (СПЭ без добавки), у которого концентрация триингов типа «бант» оказалась примерно втрое выше, чем у остальных.

На рис. 5 представлена сводная информация о максимальных длинах ВТ в образцах мини-кабелей (в мкм). Мы

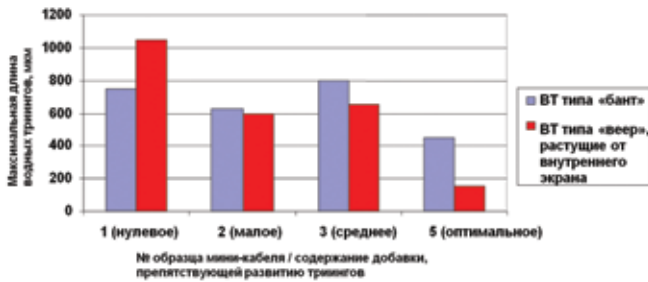


Рис. 5. Обобщенные данные о максимальных длинах водных триингов в четырех образцах мини-кабелей. Содержание добавки, препятствующей развитию триингов: 1 – нулевое, 2 – малое, 3 – среднее, 5 – оптимальное

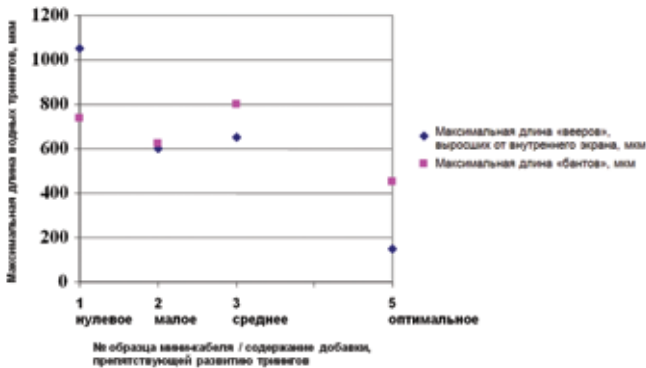


Рис. 6. Максимальная длина триингов типа «бант» и триингов типа «веер», растущих от внутреннего экрана в образцах мини-кабелей как функция от содержания антитриинговой добавки

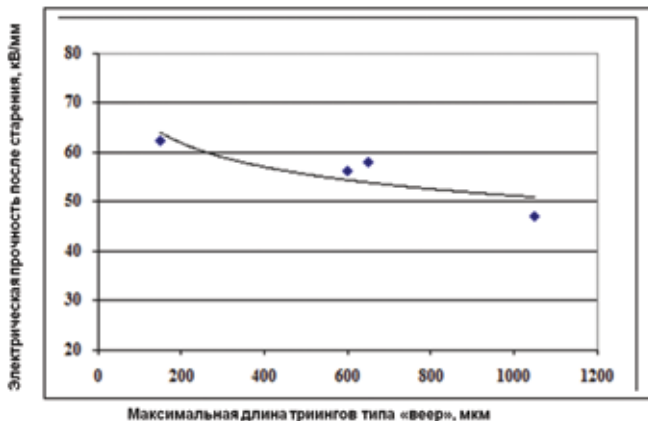


Рис. 7. Корреляция между электрической прочностью образцов мини-кабелей и максимальной длиной триингов типа «веер», выросших от экрана по жиле

предполагали увидеть в этих данных как влияние концентрации антитриинговой добавки, так и возможную корреляцию с показателями электрической прочности.

Наилучшие показатели вновь были отмечены у образца, который содержит улучшенный электропроводящий компанд, а также характеризуется оптимальным содержанием добавки к СПЭ. Именно здесь максимальная длина триингов типа «веер», выросших от экрана по жиле, оказалась наименьшей. Ее величина зависит, главным образом, от состава материала изоляции, но также может варьировать в зависимости от характера дефектов вблизи поверхности раздела, как об этом говорилось выше.

Мы уже упоминали о следующих наших предположениях: наличие антитриинговой добавки существенно подавляет развитие ВТ типа «бант», и в образцах мини-кабелей с более высоким содержанием этой добавки длина таких триингов оказывается меньше. Однако результаты исследований свидетельствуют о следующем: максимальная длина триингов типа «бант» в образце № 1 (без добавки) лишь немногим больше, чем в образцах № 2 и 3 (с малым и средним содержанием добавки соответственно). Эти данные в графической форме представлены на рис. 6 вместе с результатами измерений максимальной длины триингов типа «веер», выросших у внутреннего экрана. Явная корреляция между длиной «бантов» и содержанием антитриинговой добавки отсутствует, а вот длина триингов типа «веер» по мере увеличения содержания этой добавки уменьшается.

Объединение представленных ранее данных по электрической прочности подвергшихся влажному старению образцов мини-кабелей с данными о ВТ позволяет проверить наличие корреляции между максимальной длиной триингов типа «веер» и электрической прочностью образцов после старения. Полученные при этом результаты изображены на рис. 7.

Несмотря на то, что построение графика проводилось всего по четырем точкам, приведенные данные позволяют предположить наличие корреляции между максимальной длиной триингов типа «веер» и электрической прочностью образцов мини-кабелей после старения.

Обобщения и выводы

В настоящее время общепринято, что наличие ВТ в кабельной изоляции из СПЭ является одним из наиболее существенных факторов, вносящих вклад в снижение электрической прочности кабелей среднего напряжения в процессе эксплуатации. В стремлении к минимизации масштабов данной формы старения химической промышленностью созданы изоляционные композиции, обладающие определенной стойкостью к развитию ВТ. При этом желаемый эффект был достигнут путем введения в материал небольшого количества полярных полимеров. В данной статье рассмотрены результаты испытаний на ускоренное влажное старение пяти групп мини-кабелей с различным содержанием таких добавок. Все мини-кабели характеризовались высоким уровнем электрической прочности в исходном состоянии: она составила около 100 кВ/мм. Вместе с тем электрическая прочность снижается в процессе старения во влажных условиях при повышенных температурах и напряженностях электрического поля. Это снижение может быть сведено к минимуму посредством подбора оптимального содержания добавки, противодействующей росту триингов.

Оценка концентрации триингов типа «бант» в изоляции мини-кабелей показала, что у образцов из гомополимер-

ного СПЭ без добавок она оказалась примерно втрое выше, чем у образцов, содержащих добавки. Кроме того, образец мини-кабеля, содержащий экран из нового улучшенного электропроводящего компаунда с оптимальным содержанием добавок продемонстрировал самую низкую концентрацию и наименьшую длину трингов типа «веер». При этом обнаружена корреляция между максимальной длиной трингов типа «веер» и электрической прочностью образцов мини-кабелей.

Литература

1. *T. Miyashita*. Proceedings of the IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference. – Boston, 1969. – P. 131–135.
 2. *T. Tabata, T. Fukuda, Z. Iwata*. Proceedings of the IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing. – Portland, 1970. – P. 1361–1370.

3. *L. Dissado, J. Fothergill*. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. – London: UK, Peter Peregrinus Ltd., 1992.
 4. *E. Steennis*. Kema Scientific & Technical Report, Vol. 8, No. 3 June 1990.
 5. *H. Matsuba, E. Kawai*. Water Tree Mechanisms in Electrical Insulation, IEEE Transactions, PAS. – 1976. Vol. 95. – P. 660–670.
 6. *A. Ashcraft*. Factors Influencing Treeing Identified, Electrical World, De. – 1977. – P. 38–40.
 7. *B. Bernstein, N. Srinivas, P. Lee*. Annual Report on the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena –, 1075 IEEE, New York. P. 296–302
 8. *A. Bulinski, S. Bamji, R. Densley*. The Effect of Frequency and Temperature on Water Tree Degradation of Miniature XLPE Cables, IEEE, Transactions on Electrical Insulation, E1-21. – New York, 1986. – P. 645–650.
 9. *Шувалов М.Ю., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Удовицкий П.Ю., Мнека А.С.* Развитие водных трингов в экструдированной кабельной изоляции как электрический эффект Ребиндера. Часть 1 // Кабели и провода. – 2006. – № 4. – С. 14–19. Часть 2 // Кабели и провода. – 2006. – № 6. – С. 8–12.

ООО «ВНИИКП-ОПТИК» – это качественная продукция и современный подход к разработке оптических кабелей связи

ПРОДУКЦИЯ:

- оптические кабели для общепромышленного и специального применения (полевые, морские, внутриобъектовые, подвесные, огнестойкие, кабели-датчики и пр.);
- электрические провода и кабели связи широкого диапазона применения;
- оптические шнуры и пигтейлы;
- безынерционные катушки для скоростной размотки оптического кабеля.

УСЛУГИ:

- разработка новых конструкций оптических кабелей;
- разработка технических условий и конструкторской документации;
- проведение испытаний готовой продукции;
- подготовка аналитических материалов и анализ рынка в области кабелей связи;
- оконцевание оптических кабелей;
- проектирование сетей связи.



Контакты:
 111024, г. Москва,
 шоссе Энтузиастов, дом 5
 Тел./факс: +7 (495) 671–1241
 E-mail: vniikp-optic@mail.ru

Более подробную информацию можно получить на сайте www.vniikp-optic.com

ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

Стоимость подписки на I полугодие 2012 года (3 номера), в рублях с учетом НДС:

для членов Ассоциации «Электрокабель» – 1275 руб.,
 для учебных заведений и студентов – 480 руб.,
 для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1380 руб.,
 для подписчиков других зарубежных стран – 33 у.е.

По вопросам подписки обращайтесь к Алле Евгеньевне Тимофеевой: (495) 918–1627

Копию платежного поручения с отметкой банка об исполнении для юридических лиц или квитанцию почтового перевода для физических лиц вышлите, пожалуйста, по адресу: ООО «Журнал «Кабели и Провода», Россия, 111024, Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, офис 1202. E-mail: kp@vniikp.ru

Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427;
 КПП 772201001;
 ОКОНХ 87100
 р/с: 40702810238120102932
 в Лефортовском ОСБ 6901, г. Москва
 «Сбербанк России ОАО», г. Москва,
 к/с: 3010181040000000225
 БИК 044525225; ОКПО 18711078.

Подписной индекс в каталогах агентств «Роспечать» и «Урал-Пресс» – **79943**