

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ И КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РЫНКЕ РОССИИ

АВТОРЫ:

С. КРИ,  
DOW ELECTRICAL &  
TELECOMMUNICATIONS

БАРИНОВ, В. А.  
К.Т.Н., ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

**В** настоящее время в России эксплуатируется большое количество кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. Однако, кабель с изоляцией из поперечно-сшитый полиэтилен низкой плотности

допускает более высокую максимально допустимую температуру токопроводящей жилы по сравнению с кабелем с бумажно-пропитанной изоляцией. Именно поэтому по нему можно передавать больше электроэнергии.

**Ключевые слова:** кабели, изоляция, поперечно-сшитый полиэтилен низкой плотности, расходы на жизненный цикл.



В 2012 году общая стоимость мирового рынка силовых кабелей составила 179 млрд. \$

## ВВЕДЕНИЕ

Выпускаемые в Западной Европе кабели среднего напряжения обычно состоят из одного или нескольких алюминиевых или медных проводников, покрытых несколькими слоями полимерных материалов (как правило, это внутренний полупроводящий слой, слой изоляции и наружный полупроводящий слой). При изготовлении кабеля, в зависимости от его конструкции и назначения, добавляются дополнительные слои, такие как водоблокирующая лента и металлический экран, покрытые полимерной оболочкой, предназначение которой – обеспечить механическую прочность и паронепроницаемость.

В настоящее время в качестве основного изоляционного материала используется поперечно-сшитый полиэтилен низкой плотности (СПЭ). Полиэтилен низкой плотности (ПНП) идеально подходит для изготовления кабельной изоляции благодаря своим уникальным диэлектрическим свойствам и технологичности [1]. Он обладает малой диэлектрической постоянной, низким значением тангенса угла диэлектрических потерь и высоким удельным сопротивлением. Однако, будучи термопластом полукристаллической структуры, полиэтилен при высокой температуре размягчается и начинает течь, быстро теряя

механические свойства, что весьма ограничивает допустимый интервал температур для использования этого материала. Этот недостаток устраняется при помощи поперечной сшивки полимерных цепей. Основная технология сшивки – пероксидная сшивка, осуществляемая на наклонных линиях непрерывной вулканизации. В кабелях среднего и высокого напряжения существует внутренний полупроводящий слой, предназначенный для сглаживания и выравнивания сильного неоднородного электрического поля. Он представляет собой полимер или смесь полимеров с содержанием технического углерода 30-40%. Полупроводящий слой (обычно на основе сополимера этилена) также сшивается при помощи пероксидов. Наконец, поверх изоляции экструдирован наружный полупроводящий слой, который может быть либо прочно пришитым к изоляции или отделяемым, что зависит от требований рынка или технических спецификаций заказчика.

Однако для полимерной изоляции и полупроводящих слоев характерны некоторые проблемы. В частности, наличие дефектов (таких, как пустоты или примеси в изоляции, а также выступы и ионные примеси в полупроводящих слоях) ведет к ухудшению характеристик кабеля. За последние 10-20 лет

## ИНФОРМАЦИЯ

### ПРЕИМУЩЕСТВА КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА:

- за счет увеличения допустимой температуры жилы допускается большая пропускная способность кабеля, чем у кабелей с бумажной изоляцией;
- высокая устойчивость к влаге, при этом отпадает необходимость в металлической оболочке;
- при коротком замыкании обеспечивается больший ток термической устойчивости;
- изоляционные электрические характеристики выше, а диэлектрические потери ниже;
- меньше допустимый радиус изгиба кабеля;
- поскольку для изоляции и оболочки применяются полимерные материалы, то для прокладки кабелей при температурах  $-20^{\circ}\text{C}$  их предварительный подогрев не требуется;
- неограниченные возможности по прокладке кабелей на трассах с любой разностью уровней.

## ПРИМЕРЫ ВОДНОГО ТРИИНГА

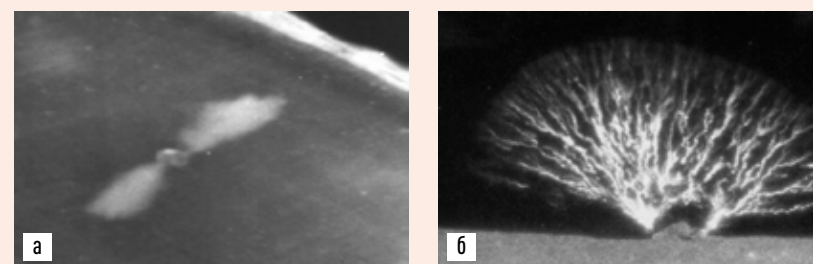


Рис. 1. а) типа «веер» и (b) типа «бант» в изоляции из СПЭ

## ПРИМЕРЫ РАЗЛИЧИЙ КАБЕЛЕЙ С БПИ И КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СПЭ

Характеристика	Тип изоляции кабеля	
	Бумага	Триингостойкий СПЭ
Стоимость метра кабеля	Меньшая первоначальная стоимость	Большая первоначальная стоимость
Прогнозируемый срок службы	Более короткий срок службы	Более длинный срок службы
Стоимость монтажа	Меньшая длина кабеля Больше соединительных муфт, но более дешевые муфты	Большая длина кабеля Меньше соединительных муфт, но более дорогие муфты
Потери в кабеле	Большие потери в диэлектрике	Меньшие потери в диэлектрике
Пропускная способность	Меньшая пропускная способность кабеля для одного и того же сечения	Большая пропускная способность кабеля для одного и того же сечения

Таблица 1

было предпринято немало попыток увеличить срок службы кабельных систем среднего напряжения.

Использование более чистой изоляции (содержащей меньше приме-

сей и загрязнений) способствовало уменьшению числа отказов кабельных линий. Эксплуатационные качества кабелей среднего напряжения с полимерной изоляцией значительно улучшились с применением

триингостойкого СПЭ. Использование технологии тройной экструзии обеспечило гладкую поверхность на границах между изоляционным и полупроводящими слоями и явилось значительным достижением в их производстве.

Наконец, внедрение экструзионных кабельных оболочек из линейного полиэтилена низкой плотности (LLDPE) и полиэтилена высокой плотности (HDPE), которые препятствуют диффузии влаги в кабельную изоляцию и защищают ее от механических повреждений, стало еще одним шагом вперед в конструкции кабелей.

Первые кабели с изоляцией из СПЭ не имели защиты от механизма старения, известного под названием «водный триинг» («water treeing») приводящего к быстрому повреждению кабеля [5,6]. Образование водного триинга в изоляции из СПЭ является одним из основных факторов снижения диэлектрической прочности кабелей среднего напряжения. Водный триинг образуется в результате комбинированного воздействия воды, ионных примесей и электрического поля и выглядит

## ЗАВИСИМОСТЬ КОЛИЧЕСТВА ОТКАЗОВ КАБЕЛЯ ОТ ВРЕМЕНИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ КАБЕЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ СРОКИ СЛУЖБЫ КАБЕЛЕЙ

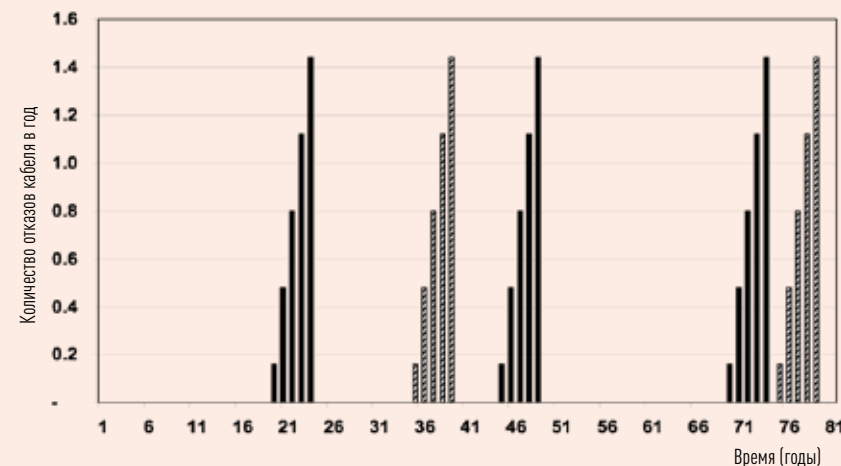


Рис. 2. А (сплошные линии), кабель В (штриховые линии)

как древовидная сеть микроскопических каналов в толще изоляции, заполненных водой[7]. По этим каналам (диаметром около 10 нм) влага проникает внутрь под действием градиента напряжения. Примеры триинга типа «веер», в котором рост начинается на поверхности раздела между изоляцией и полупроводящим слоем, и триинга типа «бант», рост которого инициируется дефектом в изоляции XLPE, показаны на рисунке 1.

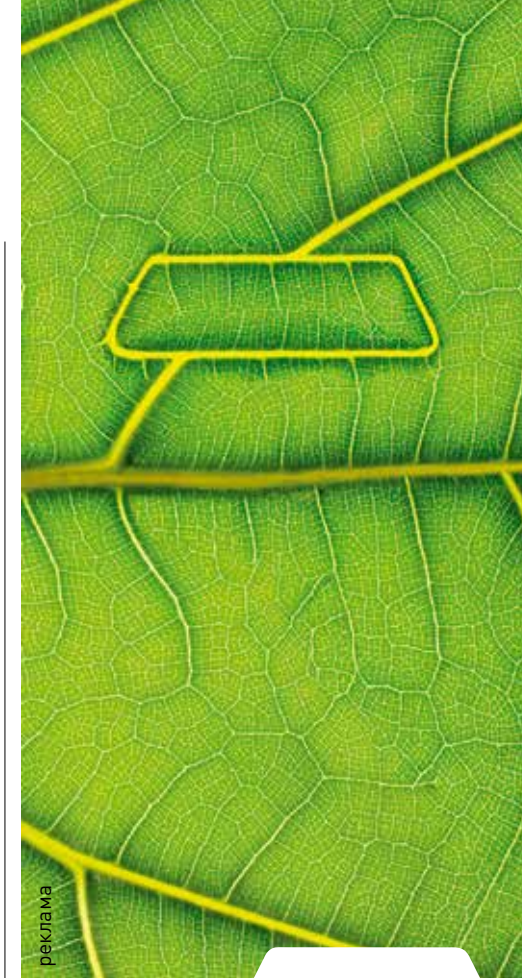
Использование триингостойкой изоляции из СПЭ(TR-XLPE) на протяжении многих лет было преобладающим видом технологии создания кабелей среднего напряжения на североамериканском рынке кабелей [8, 9]. и в некоторых странах западной Европы, например, в Германии. Недавние испытания некоторых кабелей, находившихся в эксплуатации, проведенные в США, показали, что этот подход оправдал себя. Компания Alabama Power провела испытания кабеля напряжением 35 кВ с изоляцией толщиной 8,8 мм, выполненной из триингостойкого СПЭ фирмы Dow, проработавшие 17 лет[10, 11]. Испытания на ускоренное старение, проведенные согласно требованиям североамериканской ассоциации AEIC, показали, что кабели по-прежнему соответствуют требованиям заказчика.

Однако в России в настоящее время в эксплуатации находится все еще большое количество кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ).

В табл. 1 приведены основные характеристики этих двух типов кабеля. Видно, что каждый из кабелей имеет свои достоинства и недостатки. Однако, следует помнить, что оба типа кабеля пригодны для использования и надежно проводят электрический ток в течение всего срока службы.

Кабели с БПИ российского производства имеют относительно невысокую стоимость благодаря использованию местных недорогих материалов (бумаги) и производственных линий, давно находящихся в эксплуатации и полностью себя уже окупивших. Если при покупке кабеля основным критерием является цена, лучше выбрать кабель с БПИ. Если же основным критерием является увеличение пропускной способности линии, то предпочтение следует отдать кабелю с изоляцией из СПЭ, поскольку он имеет более высокую максимально допустимую температуру токопроводящей жилы по сравнению с кабелем с БПИ (при условии, что сравниваются кабели с одинаковым сечением проводника). В последнем случае перед покупателем возникает еще задача выбора компромиссного решения: кабель большего сечения имеет большую пропускную способность и меньшие потери, но большую первоначальную стоимость кабеля [12].

Анализ расходов на жизненный цикл - это метод, помогающий владельцам производственных объектов принимать адекватное решение об инвестициях. Расчет этих расходов позволяет определить полные затраты владельца актива с учетом всех существенных факторов (помимо первоначальной стоимости актива). В сетевых компаниях такими факторами могут быть стоимость монтажа, расходы на потери в кабелях, приблизительные расходы на техническое обслуживание и ремонт в течение жизненного цикла актива и различия жизненного цикла активов [7-12]. Соответственно такой анализ позволяет рассматривать, помимо первоначальной стоимости, прочие факторы производственного объекта для систематического сравнения конкурентных технологий.



реклама



**Главное в энергетике – изоляция.  
Мы поможем Вам её защитить!**

- Определение места повреждения
- Испытание и диагностика кабельных сетей
- Испытание изоляционных материалов
- Плановое обслуживание



BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH  
Raiffeisenstraße 8 · A-6832 Sulz, Austria  
+43 5522 4941-0 · headoffice@baur.at

В данной работе приведен расчет расходов на жизненный цикл кабелей с БПИ и кабелей с TR-XLPE-изоляция на основе данных и информации, предоставленных ОАО «Ленэнерго». Как известно, ОАО «Ленэнерго» - одна из крупнейших распределительных сетевых компаний в России. Зона обслуживания компании включает Санкт-Петербург и прилегающий регион (площадь Ленинградской области 85,9 тыс. кв км-0,5% площади России) и снабжает электроэнергией 6,5 миллионов потребителей (4,5% населения России).

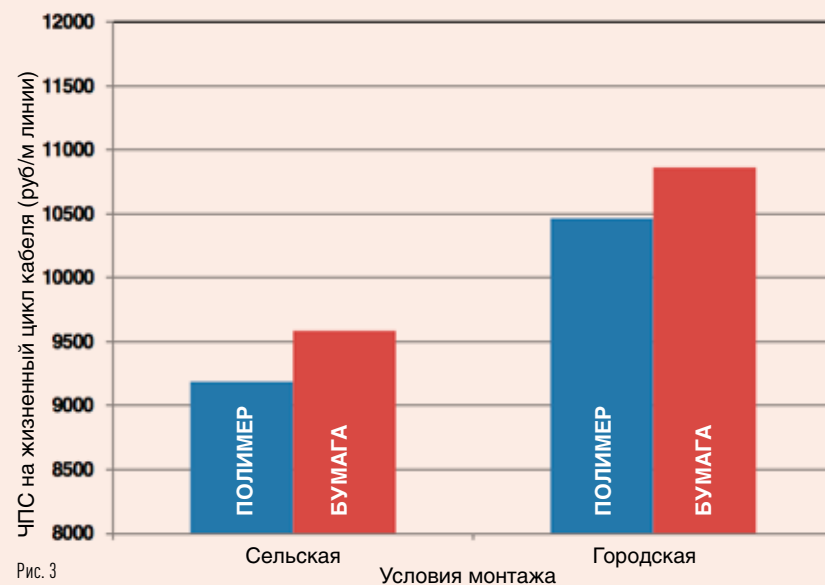
## МОДЕЛЬ

Была разработана простая модель расходов на жизненный цикл [13,14], учитывающая следующие факторы:

- Стоимость кабеля
- Стоимость монтажа кабельной линии
- Прогнозируемый срок службы кабеля
- Условия окончания срока службы – время до потери надежности, количество отказов кабеля до его замены
- Расходы на восстановление кабеля после повреждения
- Расходы на техническое обслуживание
- Расходы, связанные с потерями в кабеле (потери в проводнике, диэлектрике и оболочке)

Так как за более длительный период времени в кабеле с более коротким жизненным циклом происходит больше отказов, чем в кабеле с более длинным жизненным циклом то, для более эффективного сравнения кабельных технологий, используемых кабели с различным прогнозируемым сроком службы

## РАСЧЕТ ЧИСТОЙ ПРИВЕДЕННОЙ СТОИМОСТИ РАСХОДОВ НА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ КАБЕЛЯ С БПИ И КАБЕЛЯ С ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ, ПРОКЛАДЫВАЕМЫХ В СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ И В ГОРОДЕ, ПРОВОДИЛСЯ ПРИ УСЛОВИИ, ЧТО ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ КАБЕЛЕЙ ОБОИХ ТИПОВ - 30 ЛЕТ



(которые будут рассмотрены в этом документе), результаты моделирования рассчитываются для нескольких жизненных циклов: На рис. 2 показаны жизненные циклы за 80 лет кабелей с 25-летним жизненным циклом (кабель А) и 40-летним жизненным циклом (кабель В). Предполагается, что оба типа кабеля прокладываются один раз в год и отказы кабелей обоих типов начинают появляться за 5 лет до окончания жизненного цикла (т.е. в данном случае через 20 и 35 лет службы кабеля). По завершению жизненного цикла кабели заменяются на кабели такого же типа; так кабель А первый раз заменяется через 25 лет службы, а кабель В - через 40 лет. За 80 лет

линия, содержащая кабель А, заменялась чаще (три раза) и испытывала больше отказов, чем линия, содержащая кабель В (дважды).

В примере, показанном на рис. 2, увеличение количества отказов в конце жизненного цикла кабеля приближено к точке поворота на U-образной кривой надежности. В этом примере не учитывались отказы в начале жизненного цикла кабеля (в период приработки) и повреждения по вине третьей стороны.

Другой метод моделирования отказов кабеля - сбор распределительными сетевыми компаниями статистических данных об отказах

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАСХОДЫ НА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ КАБЕЛЯ С БПИ (ЧИСТАЯ СТОИМОСТЬ) ПО СРАВНЕНИЮ С КАБЕЛЕМ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СПЭ ПРИ УСЛОВИИ, ЧТО ПРОГНОЗИРУЕМЫЙ ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ КАБЕЛЕЙ ОБОИХ ТИПОВ - 30 ЛЕТ

	Тип местности	
	Сельская	Город
Дополнительные расходы на жизненный цикл кабеля с БПИ (чистая стоимость)	4,3%	3,8%

Таблица 2

## ИЗМЕНЕНИЕ ЧИСТОЙ ПРИВЕДЕННОЙ СТОИМОСТИ РАСХОДОВ НА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ КАБЕЛЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КАБЕЛЯ ОТ ЭТАЛОННОГО (30 ЛЕТ) ДЛЯ КАБЕЛЕЙ ОБОИХ ТИПОВ

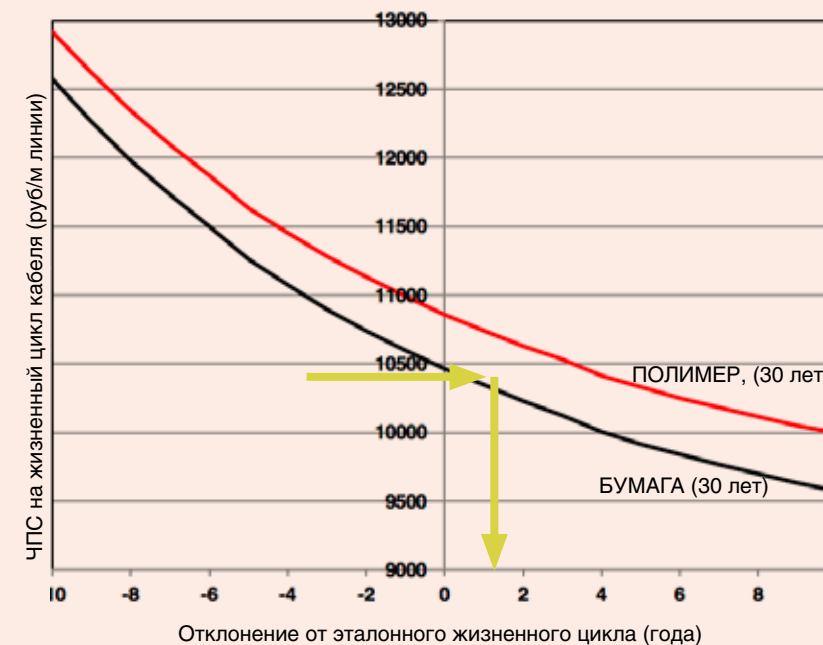


Рис. 4

(например, количество отказов на 100 километрах линии за год) и преобразование их в среднюю стоимость восстановления одного метра линии за каждый год использования кабеля до окончания его жизненного цикла). В настоящей работе используется именно этот метод, причем расчет всех расходов основан на данных, предоставленных ОАО «Ленэнерго». Эта модель также учитывает расходы на монтаж новой линии после окончания жизненного цикла существующей линии. Например, при расчете расходов на жизненный цикл кабелей (проложенных в трубопроводах) за первый год необходимо учитывать расходы на монтаж как кабелей, так и трубопроводов. Однако в конце жизненного цикла кабеля необходимо заменить только кабели, поскольку трубопроводы можно использовать повторно.

В этой модели не учитывались косвенные финансовые последствия отказов кабеля (например, потеря репутации компании, штрафы контрольно-надзорных органов или снижение доходов). Дополнительные сведения о данной модели можно найти в [13].

Рисунок 2: Зависимость количества отказов кабеля от времени использования для кабелей, имеющих различные предполагаемые сроки службы: кабель А (сплошные линии), кабель В (штриховые линии)

## ПРИМЕР АНАЛИЗА

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Рассматриваются кабели с БПИ и полимерной изоляцией сечением 240 кв. мм на 10 кВ, широко используемые ОАО «Ленэнерго». Компания предоставила подробные данные о расходах на кабели, зем-

## ИЗМЕНЕНИЕ ЧИСТОЙ ПРИВЕДЕННОЙ СТОИМОСТИ РАСХОДОВ НА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ КАБЕЛЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КАБЕЛЯ ОТ ЭТАЛОННОГО (ЭТАЛОННЫЙ ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ДЛЯ КАБЕЛЕЙ С БПИ СОСТАВЛЯЕТ 30 ЛЕТ, А ДЛЯ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ ТРИИНГОСТОЙКОГО СПЭ ДОСТИГАЕТ 40 ЛЕТ)

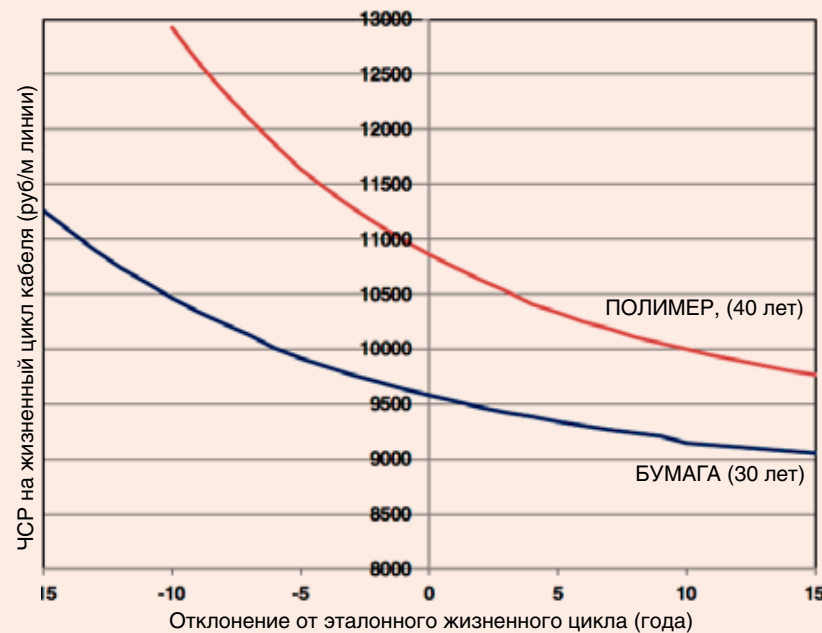


Рис. 5

ляные работы, прокладку, установку и восстановление поврежденного кабеля. При оценке расходов на жизненный цикл кабеля многие расходы на кабели обоих типов одинаковы, (например, земляные работы), однако, есть и много различий:

- Стоимость метра кабеля с БПИ ниже стоимости кабеля с изоляцией из триингостойкого СПЭ
- Строительная длина кабеля с изоляцией из СПЭ больше, чем кабеля с БПИ
- Кабели с БПИ имеют бо-

лее низкую максимальную рабочую температуру (70°C), чем кабели с изоляцией из СПЭ (90°C)

Стоимость монтажа кабелей с изоляцией из СПЭ выше стоимости монтажа кабелей с БПИ, так как для монтажа требуются более квалифицированные специалисты

Поскольку кабели с БПИ имеют более низкую максимальную рабочую температуру, чем кабели с изоляцией из сшитого полиэтиле-

на, они имеют меньшую пропускную способность. Другими словами, первоначальная стоимость кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена выше, однако характеристики таких кабелей в течение всего жизненного цикла кабеля лучше, чем у кабелей с БПИ такого же сечения (например, они имеют более высокую пропускную способность). Эту характеристику кабеля необходимо учитывать при оценке расходов на жизненный цикл.

Еще одно ключевое различие этих типов кабелей - конструкция кабеля. Кабели с БПИ, ранее закупаемые ОАО «Ленэнерго», - трехжильные, а кабели с изоляцией из СПЭ - одножильные. Большее расстояние между жилами кабеля с полимерной изоляцией (по сравнению с расстоянием между жилами кабеля с БПИ) обеспечивает более эффективное охлаждение кабеля, а следовательно, большую пропускную способность. О том, как различие в пропускной способности этих двух типов кабеля влияет на расходы на жизненный цикл кабеля, будет сказано ниже.

Основываясь на опыте коммерческого использования (это также подтверждается опытом использования в местной промышленности), ОАО «Ленэнерго» полагает, что срок службы кабелей обоих типов достигает 30 лет. На самом деле срок службы кабелей обоих типов больше 30 лет. В отличие от России распределительные энергокомпании Западной Европы и Северной Америки считают, что срок жизни кабеля с полимерной изоляцией составляет 40 лет [13,18].

Прокладка кабеля в городской и сельской местности (согласно ОАО «Ленэнерго») в основном производится непосредственно в землю. В обсуждаемом примере не рассматривается прокладка кабеля в трубопроводы, хотя создать такую модель возможно.

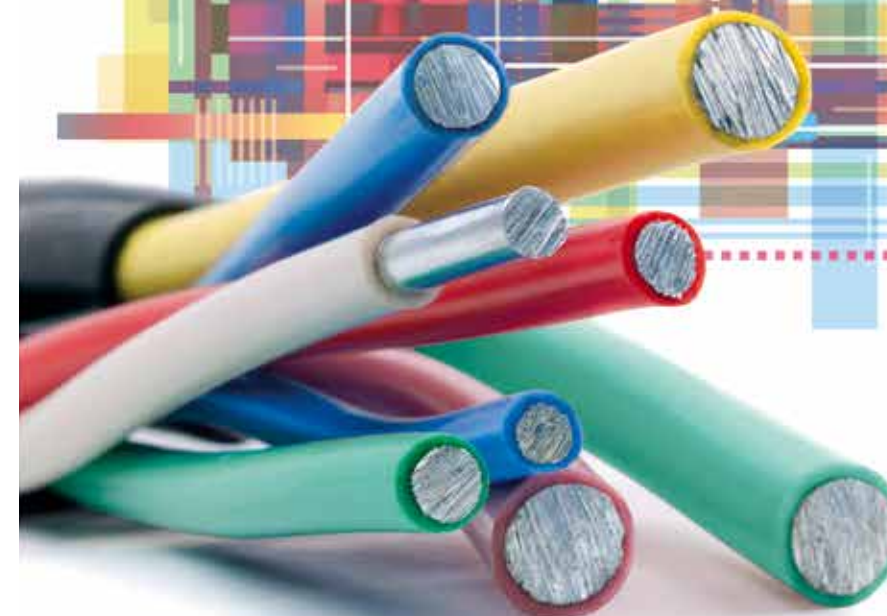
# Cabex — энергия успеха



14-я Международная выставка кабельно-проводниковой продукции

17-20 марта 2015 года  
Москва, КВЦ «Сокольники»

- Кабели
- Провода
- Электротехника
- Электромонтаж



забронируйте стенд на  
[www.cabex.ru](http://www.cabex.ru)



Организаторы:



Тел: +7 (495) 935 81 00  
E-mail: cabex@ite-expo.ru



Генеральный интернет-партнер:



Реклама

## АНАЛИЗ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ СТОИМОСТИ

Был проведен расчет расходов на жизненный цикл этих двух типов кабеля (на основе данных ОАО «Ленэнерго»), результаты которого приведены ниже. Также был проведен анализ чувствительности и разработан метод компенсации более высокой пропускной способности кабелей с TR-XLPE-изоляцией по сравнению с кабелями с БПИ.

На рис. 3 показана чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля (для кабеля с БПИ и изоляцией из СПЭ) при прокладке кабеля в городе и сельской местности при условии, что жизненный цикл кабеля в обоих случаях составляет 30 лет. Прокладка кабеля в сельской местности дешевле, чем в городе, поскольку расходы на земляные работы ниже, и соответственно, чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля, прокладываемого в сельской местности ниже, чем для кабеля, прокладываемого в городе. В обоих случаях чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля с изоляцией из СПЭ ниже, чем для кабеля с БПИ (см. табл. 2).

На рис. 4 показано отклонение прогнозируемого жизненного цикла кабеля от эталонного жизненного цикла (30 лет). В обоих случаях эталонный жизненный цикл составляет 30 лет. При перемещении по графику вправо жизненный цикл кабеля увеличивается по сравнению с эталонным жизненным циклом. Следовательно, чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля сокращается. И, наоборот, при перемещении по графику влево жизненный цикл кабеля уменьша-

## ИЗМЕНЕНИЕ ЧИСТОЙ ПРИВЕДЕННОЙ СТОИМОСТИ РАСХОДОВ НА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ КАБЕЛЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КАБЕЛЯ ОТ ЭТАЛОННОГО (ЭТАЛОННЫЙ ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ДЛЯ КАБЕЛЕЙ ОБОИХ ТИПОВ СОСТАВЛЯЕТ 30 ЛЕТ) (СПЛОШНЫЕ КРИВЫЕ, ОСЬ СЛЕВА) И СКОРРЕКТИРОВАННЫЙ ГРАФИК С УЧЕТОМ КОМПЕНСАЦИИ РАЗЛИЧИЙ В ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ (ПУНКТИРНЫЕ КРИВЫЕ, ОСЬ СПРАВА)

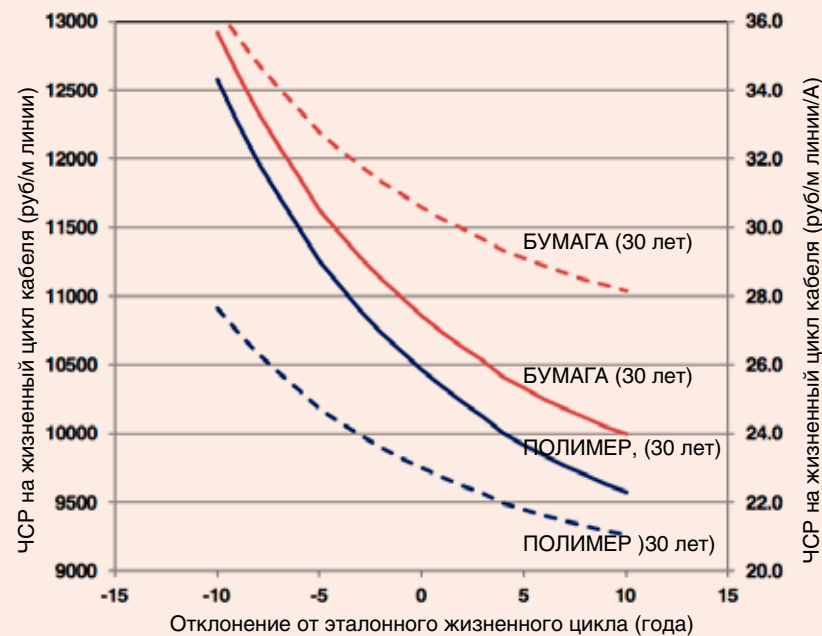


Рис. 6

ется по сравнению с эталонным жизненным циклом. Чистая стоимость расходов на жизненный цикл кабеля увеличивается. В качестве примера

– При  $x=0$ , жизненный цикл кабеля составляет 30 лет и чистая приведен-

ная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля с полимерной изоляцией составляет 10 500 рублей на метр линии. При  $x=4$ , жизненный цикл кабеля составляет 34 года и чистая приведенная стоимость расходов

## ЗНАЧЕНИЯ ЧИСТОЙ ПРИВЕДЕННОЙ СТОИМОСТИ РАСХОДОВ НА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ КАБЕЛЕЙ, СКОРРЕКТИРОВАННЫЕ ДЛЯ РАЗНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

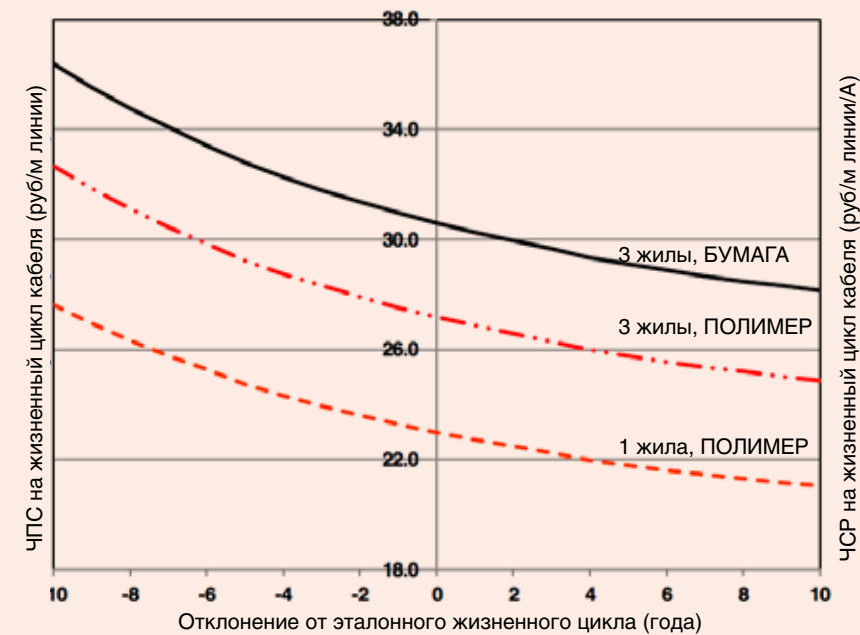


Рис. 7. 3-жильного кабеля с БПИ (сплошная линия), 3-жильного кабеля с изоляцией из СПЭ (штрихпунктирная линия) и одножильного кабеля с изоляцией из СПЭ (пунктирная линия). Данные приведены при условии прокладки кабеля в городе и 30-летнем прогнозируемом жизненном цикле

на жизненный цикл кабеля с полимерной изоляцией составляет 10 000 рублей на метр линии. При  $x=-6$ , жизненный цикл кабеля составляет 24 года и чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля с полимерной изоляцией составляет 11 500 рублей на метр линии

Стрелка на рис. 4 демонстрирует результат оценки - чтобы чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля с БПИ была равна чистой приведенной

стоимости расходов на жизненный цикл кабеля с изоляцией из СПЭ при 30-летнем жизненном цикле кабеля ( $x=0$ ), жизненный цикл кабеля с БПИ должен быть на 3 года больше эталонного жизненного цикла (30 лет), то есть 33 года.

В России энергокомпании используют кабели с полимерной (TR-XLPE) изоляцией и радиальным водоблокирующим слоем. Одной из таких компаний является ОАО «Ленэнерго». Во многих странах (например, в Германии и США) кабели с триингостойкой изоляцией не имеют радиальной герметизации и в тоже время об-

### ИНФОРМАЦИЯ

## ИЗ ГОСТА 18410-73 «КАБЕЛИ СИЛОВЫЕ С ПРОПИТАННОЙ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ»:

- Бумажная изоляция кабелей должна быть пропитана вязким или нестекающим изоляционным пропиточным составом. В пропитанной бумажной изоляции ленты не должны иметь складок, разрывов.
- В бумажной изоляции кабелей на напряжение 6 кВ и более не допускается совпадение более трех лент, расположенных одна над другой, и двух лент, непосредственно прилегающих к жиле или экрану, наложенному на жилу.
- В кабелях на напряжение 6 и 10 кВ поверх поясной изоляции и в кабелях на напряжение 20 и 35 кВ на жилах и поверх изоляции должен быть экран из электропроводящей бумаги. Допускается экран по изоляции из металлизированной электропроводящей бумаги.

## ЭКОНОМИЯ ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОДНОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СПЭ ПО СРАВНЕНИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ С БПИ С 30-ЛЕТНИМ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРИ ПРОКЛАДКЕ В ГОРОДЕ

	Прогнозируемый жизненный цикл кабеля с изоляцией из СПЭ (годы)		
	30	40	50
Экономия (рублей/метр линии)	3,6%	11,8%	15,8%
Экономия (рублей/метр линии/А)	24,8%	31,0%	34,3%

Таблица 3

### ИНФОРМАЦИЯ

## СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ С БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Многожильные кабели с бумажной изоляцией могут быть выполнены для различных климатических условий и различных областей применения. Каждая из токопроводящих жил изолирована от других, все вместе они скручены в единый кабель, пространство между ними заполнено сульфатной бумагой, скрученной в жгуты. Бумажные кабельные ленты пропитаны стекающим составом, обычно - маслоканифольным. Кабели силовые должны соответствовать требованиям ГОСТ 18410-73.

ладают большой прогнозируемый жизненный цикл, достигающий 40 лет. Данные анализа кабелей с изоляцией из триингостойкого СПЭ, подвергавшихся старению в полевых условиях [8,9,11] и результаты исследований ускоренного старения [18] свидетельствуют о том, что жизненный цикл таких кабелей может превышать 40 лет и достигает даже 50 лет [13]. Учитывая, что кабели, прокладываемые ОАО «Ленэнерго», имеют радиальную герметизацию, вероятность развития водных триингов в таких кабелей очень низка. В случае повреждений триингостойкая изоляция замедляет рост водных триингов. Поэтому вполне реально, что кабели с дополнительной защитой от воды, используемые ОАО «Ленэнерго», будут иметь 50-летний жизненный цикл.

На рис. 5 показан график для случая, когда кабель с БПИ имеет 30-летний прогнозируемый жизненный цикл, а кабель с изоляцией из триингостойкого СПЭ - 40-летний жизненный цикл. На графике видно, что:

– При X=0 жизненный цикл кабеля с БПИ составляет 30 лет, а жизненный цикл

кабеля с TR-XLPE-изоляцией – достигает 40 лет. При X=5 жизненный цикл кабеля с БПИ составляет 35 лет, а жизненный цикл кабеля с TR-XLPE-изоляцией достигает 45 лет.

При увеличении прогнозируемого срока жизни кабеля с 30 до 40 лет для кабелей с изоляцией из триингостойкого СПЭ чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля уменьшается приблизительно на 9%. Чтобы чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля с БПИ стала равна чистой стоимости расходов на жизненный цикл кабеля с изоляцией из триингостойкого СПЭ, жизненный цикл кабеля должен быть 50 лет (на 20 лет больше эталонного срока жизни, как показано на рис. 5). Для кабелей с БПИ, прокладываемых в сельской местности, жизненный цикл увеличивается еще больше: к эталонному жизненному циклу необходимо добавить еще 23 года.

## ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ КАБЕЛЯ

Хотя из изложенного выше следует, что расходы на жизненный цикл кабеля с изоляцией из триингостойкого СПЭ меньше, чем на жизненный цикл кабеля с бумажной изоляцией, необходимо учитывать еще один фактор. Кабель с изоляцией из СПЭ имеет более высокую максимально допустимую рабочую температуру (90 °С), чем кабель с БПИ (70 °С). В данном конкретном случае (трехжильный кабель с БПИ и одножильный кабель с изоляцией из триингостойкого СПЭ с сечением провода 240 кв. мм), кабель с БПИ имеет длительно допустимый ток 355 А, а кабель с изоляцией из СПЭ - 455 А).

На рис. 6 показана чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля при прокладке в городе для 30-летнего жизненного цикла кабелей обоих типов (как показано на рис. 4), но с учетом различной пропускной способности кабелей. Без учета увеличения пропускной способности, чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля с БПИ на 3,8% выше, чем у кабеля с изоляцией из триингостойкого СПЭ. Однако, с учетом увеличения пропускной способности, чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля с БПИ на 1 ампер тока, передаваемого по кабелю, на 33% выше, чем у кабеля с изоляцией из триингостойкого СПЭ.

Это сравнение является не совсем точным, поскольку рассматриваемые кабели с БПИ -трехжильные, а кабели с изоляцией из СПЭ -одножильные и имеют большую пропускную способность благодаря более эффективному охлаждению. На рис. 7 показаны те же кривые, что и на рис. 6, и добавлена кривая для трехжильного кабеля с изоляцией из СПЭ. При прокладке кабеля в тех же условиях кабель с изоляцией из СПЭ на 11% дешевле кабеля с БПИ при расчете в рублях на 1 ампер передаваемого по кабелю тока.

В табл. 3 приведены данные об экономии чистой приведенной стоимости расходов на жизненный цикл кабеля, полученной ОАО «Ленэнерго», при выборе кабеля с изоляцией из СПЭ по сравнению с кабелем с БПИ при городской прокладке. Даже при условии, что жизненный цикл кабелей обоих типов составляет 30 лет, наиболее экономичным вариантом является кабель с изоляцией из СПЭ. Его использование позволяет сократить расходы на 3,6%. Чтобы расходы на жизненный цикл

кабеля с БПИ стали равны расходам на жизненный цикл кабеля с изоляцией из СПЭ, количество отказов кабеля с БПИ (на 100 км кабеля за год) необходимо уменьшить на 65% от текущего уровня. Если предположить, что жизненный цикл кабеля с триингостойкой изоляцией из СПЭ достигает 40 лет (что соответствует статистике, собранной в большинстве западноевропейских стран), то экономия превышает 10%. Если к этой экономии добавить еще большую пропускную способность кабелей с изоляцией из СПЭ, то экономия чистой приведенной стоимости расходов на жизненный цикл кабеля такого типа становится значительной; при самых консервативных расчетах экономия составит около 25%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные данные свидетельствуют о том, что решение ОАО «Ленэнерго» использовать кабель с изоляцией из СПЭ, а не более дешевой кабель с БПИ, является абсолютно правильным и позволит компании сэкономить средства в течение длительного периода времени. Во всех рассмотренных случаях кабель с изоляцией из СПЭ имеет наиболее низкий уровень расходов на жизненный цикл и наиболее высокую пропускную способность.

Для оценки этих результатов проводился анализ чувствительности. Этот анализ показал следующее:

– Если кабели обоих типов имеют 30-летний жизненный цикл, то для того, чтобы чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля с БПИ стала равна чистой приведенной стоимости

**ЩМК96** ГОСТ 30804.4.30-2013  
ГОСТ 32144-2013  
Класс А

ЩИТОВОЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ  
С ФУНКЦИЯМИ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ



Системы ПКЭ стали доступными

- ПРЕИМУЩЕСТВА**
- Цифровое исполнение
  - Увеличенный размер индикаторов
  - Выбор режимов индикации с помощью кнопки на лицевой панели
  - Индикаторы, отображающие наличие нарушений ПКЭ
  - Получение сформированных отчетов через почтовый сервер
  - Минимальные размеры в своем классе (96x96 мм)
  - Интерфейсы: Ethernet 10/100 BASE TX (разъем RJ45) или Ethernet 100 BASE FX (разъем ST), RS485
  - Протоколы: FTP/HTTP, IEC 60870-5-104, Modbus RTU
  - Синхронизация времени устройства NTP (RFC 5905)/PTP (IEEE 1588)

реклама

Демократичная цена

**ЩМК96 - наиболее оптимальное решение для проведения в непрерывном режиме измерения показателей качества электрической энергии и контроль их соответствия установленным нормам.**

Тел: (8352) 399-918, 399-971  
Факс: (8352) 562-562  
E-mail: marketing@elpribor.ru  
www.elpribor.ru

428000, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 3

расходов на жизненный цикл кабеля с изоляцией из СПЭ, среднее количество отказов кабелей с БПИ за год должна уменьшиться на 65% или. Если жизненный цикл кабеля с изоляцией из СПЭ составляет 40 лет, то для того, чтобы чистая приведенная стоимость расходов на жизненный цикл кабеля с БПИ стала равна чистой приведенной стоимости расходов на жизненный цикл кабеля с изоляцией из СПЭ, жизненный цикл кабеля с БПИ должен быть 50 лет.

стимулю температуру токопроводящей жилы по сравнению с кабелем с БПИ, и поэтому по нему можно передавать больше электроэнергии. Если расходы на жизненный цикл корректируются с учетом повышения пропускной способности, то экономия увеличивается до 25% даже при самых консервативных предположениях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R. Quirk, M. Alsamarraie, The Polymer Handbook 3rd Edition, p. 15-25. J. Wiley and sons.
2. C. Ku and R. Liepins, Electrical Properties of Polymers, Chapter 4, p. 102, Hanser publishers, 1987.
3. P. Caronia and S. Szaniszló, Minutes of ICC, IEEE-PES, p. 260-265, 110th meeting, October 28th 2001.
4. N. Burns, R. Eichhorn, C. Reid, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, Issue 5, p. 8-24, 1992.
5. Miyashita T., "Deterioration of water-immersed polyethylene coated wire by treeing", Proc. IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference, Boston, 1969, pp 131-155
6. Dissado L.A. and Fothergill J.C., "Electrical degradation and breakdown in polymers", Peter Peregrinus Ltd, 1992
7. E. Steennis, Kema Scientific & Technical Report, Volume 8 No. 3 June 1990.
8. Mendelsohn A., Person T.J., Shattuck G.B., Hartlein R., "Evaluation of tree retardant XLPE (TR-XLPE) and EPR insulated 35 kV cables after 17 years of field service", Proc. Inter. Conf. Insul. Power Cables, 22-26 June 2003, Versailles, pp 592-597
9. Ramachandran S., Reed R.A., "TR-XLPE cables for utility power distribution: 20 years of field proven, value added performance", Proc. Rural electric Power Conference, Rayleigh-Durham, 4-6 May 2003
10. Ramachandran S., Du L., Tan H., "Proven insulation technology for

enhanced distribution cable life and improve reliability", Proc. Asia Pacific Regional Conference on MV Power Cable Technology, 6-8 Sept 2005, Malaysia

11. T. Person, A. Mendelsohn, R. Hartlein, G. Shattuck, JiCable '03, Paper B9.5, p. 556-561.
12. Mendelsohn A., Person T.J., Shattuck G.B., Hartlein R., "Evaluation of tree retardant XLPE (TR-XLPE) and EPR insulated 35 kV cables after 17 years of field service", Proc. Inter. Conf. Insul. Power Cables, 22-26 June 2003, Versailles, pp 592-597
13. Lesur F., Lejour V., Surdon M., "Economical design of cable conductors", Proc. Inter. Conf. Insul. Power Cables, 19-23 June 2011, Versailles, pp 280-285
14. Sutton S., "A life cycle analysis study of competing MV cable materials", Proc. 21st Inter. Conf. On Electricity Distribution, 6-9 June 2011, Frankfurt
15. Pang P., Miao S., Leung S., Sutton S., "Choice of materials to improve reliability of distribution cables", High Voltage Engineering Journal, 2011, 37, pp42-46
16. Aten M. and Ferris R., "Analysis of distribution losses and life cycle CO2 emissions", Proc. 20th Inter. Conf. On Electricity Distribution, 8-11 June 2009, Prague
17. Fang X., Xu C., Wang W., "With transmission grid asset operation and maintenance fixed quota to support life cycle cost absorption and analysis", Proc. 21st International Conf. On Electricity Distribution, 6-9 June 2011, Frankfurt
18. Simisuka N., Felani I., Erdiansyah N., "Simulation of life cycle costing analysis to evaluate project of installation high voltage undersea cable 150 kV circuit III and IV Java-Bali", Proc. Inter. Conf. Insul. Power Cables, 19-23 June 2011, Versailles, pp 258-263
19. "Distribution Cable Research Digest 2000", EPRI Publication BR-110693 (Доступен только для членов общества)

## ВЫВОДЫ

На основе подробного обсуждения и детальных данных, предоставленных ОАО «Ленэнерго», был проведен анализ расходов на жизненный цикл кабеля с БПИ и кабеля с изоляцией из триингостойкого СПЭ. Результаты проведенного анализа показали следующее:

1. Если рассматривать только первоначальные расходы на жизненный цикл кабелей обоих типов, прокладываемых в городе, при условии, что жизненный цикл кабелей обоих типов составляет 30 лет, то расходы на жизненный цикл кабеля с изоляцией из СПЭ на 3,6% меньше, чем на жизненный цикл кабеля с БПИ.

2. Если предположить, что кабели с изоляцией из СПЭ будут служить 40 лет (что соответствует жизненному циклу кабелей такого типа, используемых в странах Западной Европы и США), то экономия увеличивается почти до 12%.

3. Кабель с изоляцией из СПЭ имеет более высокую максимально допу-



НИ «АВОК» Российская Муниципальная Академия

29-31 октября  
2014 года



## XXXI конференция и выставка

# МОСКВА – ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ГОРОД

### Основные разделы форума:

- Инвестиции в энергосберегающие проекты. Энергосервисные контракты.
- Нормативно-методическое обеспечение устойчивого функционирования жизнеобеспечивающих систем муниципальных образований
- Вентиляция, кондиционирование воздуха и холодоснабжение
- Отопительные системы: приборы и оборудование
- Тепло- и электроснабжение
- Учет и регулирование потребления энергоресурсов
- Зеленое строительство. Здания высоких технологий
- Водоснабжение, водоотведение и водоподготовка
- Экологическое строительство и нетрадиционные источники энергии
- Теплозащита зданий и теплоизоляционные материалы
- Уличное и внутридомовое освещение
- Светопрозрачные ограждающие конструкции
- Автоматизация и управление инженерным оборудованием зданий
- Пожарная безопасность зданий и сооружений
- Капитальный ремонт и реконструкция зданий
- Саморегулирование строительной деятельности



### Место проведения:

Москва, ул. Новый Арбат, д. 36,  
здание Правительства Москвы

Реклама

По вопросам участия обращайтесь в оргкомитет  
Тел. (495) 984-99-72 E-mail: potapov@abok.ru  
Подробная информация о мероприятии на [events.abok.ru](http://events.abok.ru)