

## Способы увеличения пропускной способности КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена

*Халилов Ф.Х.*, главный научный сотрудник СПбГПУ, действительный член Академии электротехнических наук РФ, доктор технических наук, профессор.  
*Кузнецов Д.В.*, инженер I категории ОАО «СевЗапНТЦ»

В электроэнергетике в настоящее время наметилась тенденция к применению относительно нового типа кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена различных классов напряжения. Этот тип кабелей также активно внедряется в сетях электроснабжения различных производственных комплексов. Наибольшую актуальность приобретает применение указанного вида кабелей в энергосистемах крупных городов. Известно, что все большее распространение внутри крупных городов находят кабельные линии высоких классов напряжений. Это связано с такими специфическими условиями внутри крупных городов как высокая плотность застройки, сокращение свободных площадей внутри города, связанное с развитием его инфраструктуры, высокие требования к электромагнитной совместимости электрических сетей высокого напряжения с установками техносферы и коммуникационными сетями, допустимыми уровнями воздействия электромагнитных полей, создаваемых воздушными линиями электропередачи на человека и т. д.

Естественно, что при применении нового электрооборудования возникают новые явления в электрических сетях, которых не было ранее [1]. Обусловлены они разными причинами, основные из которых заключаются в новых конструктивных особенностях, а как следствие и в новых электрических параметрах такого оборудования, которое является составной частью любой энергосистемы. Незнание основных процессов, происходящих при применении кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, приводит к авариям, ограничивающим электроснабжение потребителей, и значительным затратам временных и материальных ресурсов на устранение их последствий.

Примером сказанному могут служить значительное количество пожаров в кабельных линиях ВН и СВН с изоляцией из СПЭ, причиной которых, вероятно, является несоответствие пропускной способности кабельных линий по условию стабильности теплового баланса кабелей протекающим по ним перетокам мощности. В связи с этим для правильного выбора параметров кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена, обеспечивающих требуемую в каждом конкретном случае пропуск-

ную способность по условию теплового баланса этих кабелей, необходимо учитывать их конструктивные особенности и основные физические процессы, происходящие в них при эксплуатации.

Рассмотрим конструктивные особенности кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Основными материалами для токопроводящих жил (ТПЖ) кабелей в настоящее время являются металлы с высокой проводимостью — медь и алюминий [2]. Электропроводность алюминия в 1,65 раза меньше, чем у меди, но плотность его в 3,3 раза меньше плотности меди, что позволяет получить алюминиевые ТПЖ с одинаковым электрическим сопротивлением в два раза легче медных. Однако ТПЖ из меди имеют хорошую пластическую деформацию по сравнению с жилами из алюминия, хорошо работают на изгиб.

Что касается основной изоляции кабелей, то в современных условиях она выполняется из относительно нового для России вида изоляции — сшитого (вулканизированного) полиэтилена — СПЭ (в английском обозначении *XLPE*) [1]. При этом СПЭ находит применение для силовых проводов и кабелей напряжением от 0,4 до 500 кВ.

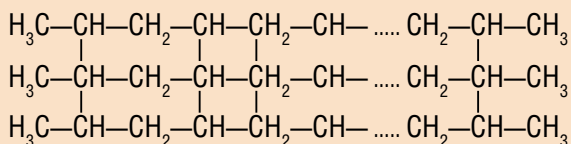
В промышленно развитых странах Европы и Америки практически 100% рынка силовых кабелей занимают кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Переход к кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена, связан с все возрастающими требованиями эксплуатирующих организаций к техническим параметрам кабелей. Обеспечение этих требований возможно благодаря тому, что СПЭ имеет ряд существенных преимуществ перед другими изоляционными материалами по физико-механическим, диэлектрическим, конструкционным и технологическим свойствам переработки. Соответственно, кабели из СПЭ обладают следующими преимуществами по сравнению с маслonaполненными кабелями, кабелями с бумажно-пропитанной изоляцией и др.: высокая пропускная способность; низкий вес, меньший диаметр и радиус изгиба; СПЭ изоляция обладает малой плотностью, малыми значениями относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 2,5$  и коэффициента диэлектрических потерь  $K = \epsilon \times \operatorname{tg} \delta$ , который остается практически постоянным, где  $\operatorname{tg} \delta = 0,001$  — тангенс угла диэлектрических по-

терь [3]; возможность прокладки на сложных трассах и монтажа без использования специального оборудования; значительное снижение себестоимости прокладки; отсутствием опасности загрязнения окружающей среды из-за отсутствия масла, а также свинцовой оболочки; низкая удельная повреждаемость кабеля (на 1-2 порядка ниже, чем у маслоснаполненного кабеля).

По комплексу свойств в качестве электрической изоляции для силовых кабелей стационарной прокладки в настоящее время с СПЭ не может конкурировать ни один вид изоляционных материалов. Основным достоинством СПЭ является увеличение рабочей температуры токопроводящей жилы кабелей с изоляцией из СПЭ до 90 °С, что означает увеличение пропускной способности таких кабелей по сравнению с кабелями с другими видами изоляции, высокий ток термической устойчивости при коротком замыкании, что особенно важно в случае, когда сечение проводника выбирается только из условий номинального тока короткого замыкания. Отметим, что для кабелей с изоляцией из СПЭ максимальная допустимая температура ТПЖ при перегрузках составляет 130 °С, при этом продолжительность работы кабеля [4] в режиме перегрузки должна быть не более 100 ч за год и не более 1000 ч за срок службы. А предельно допустимая температура ТПЖ при коротком замыкании (к.з.) равна 250 °С.

Изначально термопластичному полиэтилену присущи серьезные недостатки, главным из которых является резкое ухудшение механических свойств при температурах, близких к температуре плавления. Решением этой проблемы стало применение сшитого полиэтилена. Термин «сшивка» подразумевает обработку полиэтилена на молекулярном уровне. «Сшивка» ПЭ — это сложный химический и технологический процесс, от правильности его проведения зависят свойства СПЭ и надежность кабельных линий. Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между макромолекулами полиэтилена, создают трехмерную структуру, которая и определяет высокие электрические и механические характеристики материала, меньшую гигроскопичность, большой диапазон рабочих температур кабеля. На рисунке 1 приведена структура СПЭ.

Рис. 1. Структура СПЭ



В подтверждение сказанного выше о высокой по сравнению с другими типами изоляции допустимой рабочей температуре ТПЖ для СПЭ в табл. 1 приведены допустимые температуры нагрева токопроводящих жил кабелей с различными видами изоляции.

Табл. 1. Допустимые температуры нагрева ТПЖ жил кабелей с различными видами изоляции

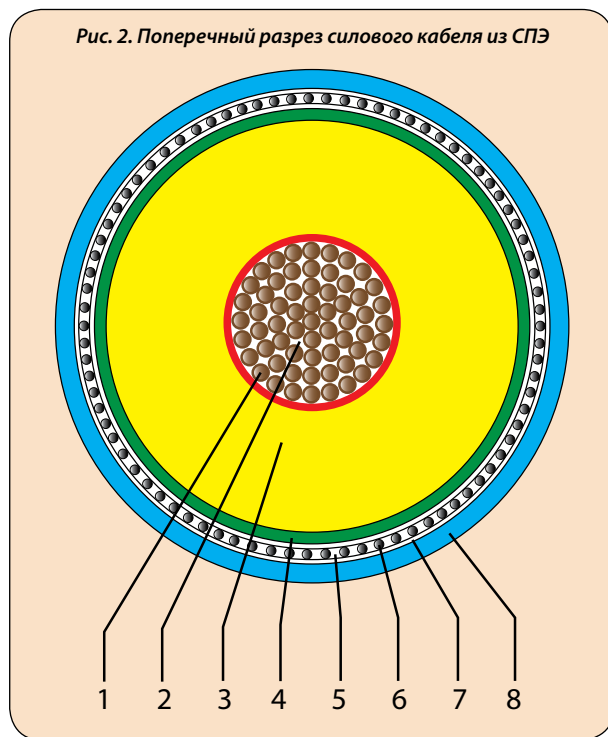
Материал	Длительная рабочая температура, °С	Предельно допустимая температуры при к.з. длительностью 4 с, °С
СПЭ	90	250
ПЭ	70	150
ПВХП	70	160

Высокий уровень напряжения жилы кабеля приводит к необходимости использования металлического экрана, основным назначением которого является обеспечение равномерности распределения электрического поля, воздействующего на главную изоляцию кабеля. Толщина экрана hэ практически для всех классов напряжения от 110 кВ [4] и выше составляет в среднем 2 мм, но при этом сечение экрана может варьироваться в пределах от 35 до 340 мм<sup>2</sup>, но не более, что обусловлено экономическими соображениями, вследствие того, что даже для кабелей с алюминиевыми жилами токопроводящий экран все равно выполняется из меди. Увеличение сечения медных экранов одножильных кабелей при относительно постоянной толщине экрана достигается за счет того, что экран выполняется из медных проволок с расстоянием между ними не более 10 мм, для увеличения площади поперечного сечения экрана при сохранении его толщины достаточно просто увеличить плотность заполнения соответствующих медных проволок. При этом медные проволоки экрана скреплены спирально наложенной медной лентой номинальной толщиной не менее 0,7 мм. Сечение скрепляющей медной ленты включается в сечение экрана.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена чаще всего выполняются в однофазном исполнении, однако бывают и трехфазными. Трехфазные силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена выполняются только до класса напряжения 110 кВ включительно и с сечением токопроводящей жилы каждой фазы не более 240 мм<sup>2</sup>, что значительно ограничивает сферу применения такой конструкции. Это ограничение связано с тем обстоятельством, что при увеличении сече-

ния токопроводящей жилы сверх 240 мм<sup>2</sup>, а также при росте толщины основной изоляции при увеличении класса напряжения сверх 110 кВ, массогабаритные параметры такого кабеля становятся таковыми, что транспортировка готового изделия с завода-изготовителя кабеля на строительную площадку и его монтаж становятся весьма затруднительными, а в ряде случаев практически невозможными. Поэтому ограничимся рассмотрением наиболее востребованной на практике однофазной конструкции кабелей из СПЭ.

На рисунке 2 показан поперечный разрез наиболее часто встречающейся на практике конструкции одножильного кабеля с изоляцией из СПЭ.



На рисунке 2: 1 — ТПЖ, медь или алюминий, круглая компактной скрутки; для сечений алюминиевой ТПЖ свыше 1200 мм<sup>2</sup> и сечений медной ТПЖ свыше 1000 мм<sup>2</sup> жила кабеля выполняется сегментированной; 2 — полупроводящий экран по токопроводящей жиле; 3 — изоляция из сшитого полиэтилена; 4 — полупроводящий экран по изоляции; 5 — промежуточный слой продольной герметизации; 6 — медный экран и влагонепроницающая лента; 7 — слой поперечной герметизации, алюминиевая лента; 8 — внешняя оболочка (полиэтилен).

Известно, что кабельные линии ВН с кабелями из СПЭ эксплуатируются с тремя возможными систе-

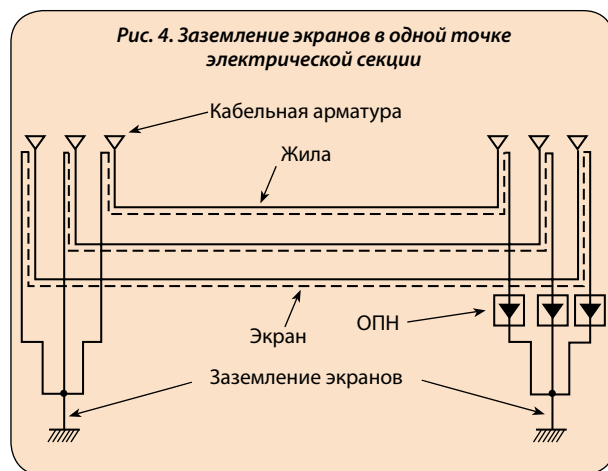
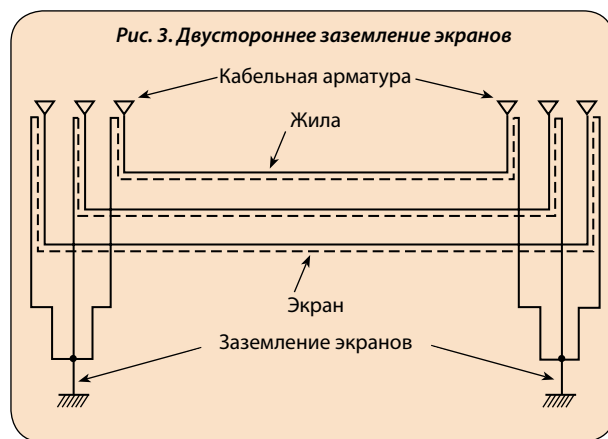
мами заземления экранов одножильных кабелей [3, 5, 6], а именно:

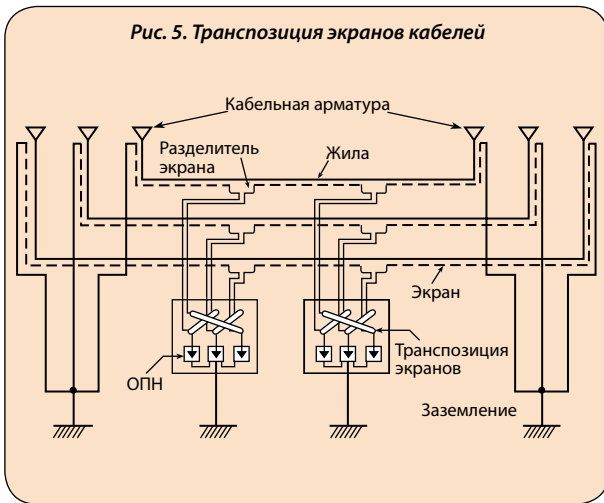
1. Заземление экранов каждой фазы по концам каждой электрической секции (электрической секцией считается часть трассы между точками, в которых соединены оболочки или экраны всех кабелей между собой или с «землей»), т.е. двустороннее заземление экранов;

2. Заземление экранов в одной точке каждой электрической секции с установкой на разземленных концах соответствующих ОПН, характеристики которых должны быть скоординированы с характеристиками защищаемой ими изоляции, в данном случае с изоляцией поверх токопроводящего экрана одножильного кабеля, т.е. внешней оболочкой кабеля, которая в последнее время выполняется из полиэтилена;

3. Транспозиция экранов соответствующих кабелей из СПЭ.

На рисунках 3, 4, 5 схематически показаны приведенные выше системы заземления экранов одножильных силовых высоковольтных кабелей из СПЭ, соответственно.





В силу однофазной конструкции кабелей из СПЭ и применения одной из трех, приведенных выше систем заземления их экранов, при прочих равных условиях пропускная способность трехфазной КЛ из СПЭ будет иметь различные значения даже при одной той же величине сечения ТПЖ. Пропускная способность кабеля определяется на основе теплового расчета.

Тепловой расчет кабелей в общем случае сводится к определению температуры ТПЖ с учетом потерь в жилах, изоляции, оболочках и броне. При этом учитываются тепловые сопротивления кабеля и окружающей среды, а также колебания температуры окружающей среды за счет сезонных изменений температуры и посторонних источников тепла, и составляются для наглядности расчета допустимых нагрузок схемы замещения тепловых сопротивлений и потоков для конкретных конструкций кабеля и условий прокладки.

В общем случае вызывающие нагрев кабеля и снижающие его пропускную способность суммарные потери на единицу длины описываются выражением [2, 3]:

$$W_{\Sigma} = W_{мпж} + W_d + W_{\text{э}} + W_{бр} + W_{ос}, \quad (2)$$

где  $W_{\Sigma}$  — суммарные потери;  $W_{мпж}$  — потери в ТПЖ;  $W_d$  — диэлектрические потери в изоляции кабеля;  $W_{\text{э}}$  — потери в металлических экранах кабеля, обусловленные выравнивающими и вихревыми токами;  $W_{бр}$  — потери в броне кабеля;  $W_{ос}$  — потери в окружающем кабель пространстве.

В большинстве практически значимых случаев потерями в окружающем кабель пространстве в условиях Санкт-Петербурга можно пренебречь.

На основании выражения (2) и тепловой схемы замещения кабеля записывается выражение превышения температуры ТПЖ по сравнению с температурой окружающей среды [7, 8]:

$$\Delta\theta = (I^2 \cdot R + 1/2 \cdot W_d) \cdot T_1 + (I^2 \cdot R(1 + \lambda_1) + W_d) \cdot n \cdot T_2 + (I^2 \cdot R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d) \cdot n \cdot (T_3 + T_4), \quad (3)$$

где  $\Delta\theta$  — превышение температуры ТПЖ по сравнению с температурой окружающей среды, К;  $I$  — допустимый ток в жиле, А;  $R$  — сопротивление ТПЖ переменному току при максимальной рабочей температуре, Ом/м;  $W_d$  — диэлектрические потери в изоляции кабеля, Вт/м;  $T_1$  — тепловое сопротивление между ТПЖ и экраном, К·м/Вт;  $T_2$  — тепловое сопротивление слоев между экраном и броней, К·м/Вт;  $T_3$  — тепловое сопротивление наружной защитной оболочки кабеля, К·м/Вт;  $T_4$  — тепловое сопротивление между поверхностью кабеля и окружающей средой, К·м/Вт;  $n$  — число ТПЖ, несущих нагрузку, в кабеле (жилы одинакового размера и несущие одну и ту же нагрузку);  $\lambda_1$  — отношение потерь в металлическом экране к общим потерям во всех ТПЖ;  $\lambda_2$  — отношение потерь в броне к общим потерям во всех ТПЖ кабеля.

Сгруппировав все слагаемые в (3), содержащие множитель в правой части уравнения, находим величину допустимой токовой нагрузки на кабель [2, 8]:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \cdot (0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4))}{R \cdot T_1 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1) T_2 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)}}, \quad (4)$$

Очевидно, что для наиболее распространенной в условиях энергосистем однофазной конструкции кабелей из СПЭ  $n = 1$ , а  $T_2$  и  $\lambda_2$  равны нулю. Кроме этого, для таких кабелей допустимо пренебречь составляющей  $\lambda_1$ , обусловленной потерями от вихревых токов.

Расчет пропускной способности КЛ по (4) следует производить при наиболее тяжелых температурных условиях эксплуатации кабеля, а именно летних температур.

На пропускную способность КЛ с изоляцией из СПЭ существенное влияние оказывает взаимное пространственное расположение фаз линии, а также глубина прокладки линии. Взаимное пространственное расположение одножильных кабелей из СПЭ в кабельных линиях различных классов напряжений обычно ограничивается двумя вариантами:

1) расположение фаз линии треугольником (при этом поверхности кабелей соприкасаются);

2) расположение фаз линии плоскостью с некоторым расстоянием между осями фаз.

При проектировании кабельных линий с кабелями из СПЭ стараются при расположении фаз треугольником расстояние между осями фаз  $I_{\Delta}$  выдерживают равным наружному диаметру  $D_n$  соответствующих одножильных кабелей, а при расположении в плоскости стараются выдержать расстояние между осями фаз  $I_{пл}$  обычно равным двум  $D_n$ .

Вполне закономерно ожидать, что при применении заземления экранов с двух сторон у соединительных и концевых муфт по экранам кабелей протекают продольные токи, так называемые «обратные», приближенные к рабочим токам в жилах, и появляется дополнительный источник тепла, кабели дополнительно греются, что приводит к снижению тока нагрузки кабеля, т.е. его пропускной способности.

При заземлении экранов кабелей в одной точке на разомкнутом конце возникает потенциал, который растет с увеличением длины кабельной линии.

Заметим, что при заземлении экранов одножильных кабелей в одной точке, а также при транспозиции экранов, которая по сути является электромагнитной компенсацией суммы э.д.с. наводимых в экранах трех секций транспозиции вследствие сдвига э.д.с на 120 электрических градусов, в них отсутствуют продольные токи, а значит и потери, создаваемые ими. Следовательно, можно утверждать, что при этих системах заземления экранов пропускная способность кабельной линии будет выше, нежели чем при двусторонней системе заземления экранов.

При расположении фаз линии треугольником электромагнитная связь между ними больше, чем при расположении плоскостью, но при этом условия теплоотвода с поверхности кабелей оказываются хуже. Поэтому при одностороннем заземлении экранов и их транспозиции ввиду отсутствия продольных токов по экранам при этом пропускная способность оказывается выше при расположении фаз линии в плоскости.

При двустороннем заземлении экранов наоборот пропускная способность выше при расположении фаз линии треугольником из-за меньших величин наведенных в экранах «обратных токов». Однако применение двусторонней системы заземления экранов однофазных кабелей из СПЭ в независимости от их пространственного располо-

жения в среднем на 40÷50% снижают ток пропускной способности КЛ по условиям их теплового баланса по сравнению с односторонней системой заземления экранов и их транспозицией. Поэтому применение двустороннего заземления экранов кабелей из СПЭ является нецелесообразным и может быть использовано только для кабельных линий малой длины (~100÷600 м), передающим малую мощность, т.е. несущими ограниченную токовую нагрузку.

Таким образом, при прочих равных условиях для достижения максимальной величины пропускной способности КЛ с изоляцией из СПЭ по условию обеспечения требований соблюдения их теплового баланса является использование односторонней системы заземления экранов или их транспозицию и расположение фаз этих линий должно быть в плоскости.

Отметим, что чем ближе к поверхности земли будет находиться КЛ, тем будет выше ее пропускная способность. Иными словами, чем глубже в земле находится КЛ, тем ее пропускная способность ниже, что обусловлено ухудшением условий отвода от нее тепла.

### Литература

1. Канискин В.А., Михасев С.Ю., Троицкий Л.К., Халилов Ф.Х., Шилина Н.А. Проблемы внедрения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в сети средних классов напряжения // «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике», 2007 г.
2. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии: Учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1996.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. — 7-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1985.
4. Технические условия ТУ 16.К71 — 273 — 98. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ. 1998 г.
5. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения // «Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования», СПб, 2008 г.
6. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов Н.А., Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. — Л.: Наука, 1988. — 302 с.
7. Международный стандарт. МЭК №60287. 2006 г.
8. Международный стандарт. МЭК №60853. 1989 г.