

Выбор сечения экранов однофазных силовых кабелей

к.т.н. Дмитриев М.В., начальник отдела научно-технических исследований
ЗАО «Завод энергозащитных устройств» (Санкт-Петербург)

В настоящее время для передачи и распределения электроэнергии, особенно в крупных городах и на промышленных предприятиях, все шире используются однофазные силовые кабели (рис.1). Непростым вопросом, который при этом неизменно приходится решать, является обоснованный выбор сечения экрана. Среди существенных факторов, влияющих на величину сечения экрана, можно назвать необходимость снижения потерь мощности в нормальном режиме работы кабеля и требование обеспечения термической стойкости экрана в аварийных режимах, сопровождающихся протеканием в экране токов короткого замыкания. К сожалению, оба фактора предъявляют противоречивые требования к сечению экрана: с точки зрения нормального режима следует использовать кабели с минимальным сечением экрана, а с точки зрения аварийных режимов короткого замыкания – повышенные сечения экранов. Ниже в статье в сжатой форме автор постарался систематизировать подход к выбору сечения экрана, хотя, разумеется, окончательную точку в подобных вопросах следует ставить только после обсуждения с привлечением широкого круга специалистов.

Конструкция кабеля и назначение экрана

Конструкция однофазного силового кабеля упрощенно показана на рис.1. В трехфазных сетях используют трехфазные группы однофазных кабелей. На рис.2-3 показаны наиболее часто используемые схемы расположения фаз одной цепи друг относительно друга – в ряд («flat-formation») или в вершинах равностороннего треугольника («trefoil-formation»), соответственно.

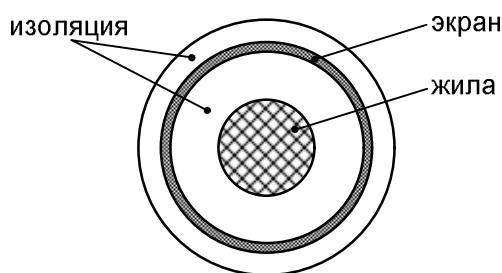


Рис.1. Однофазный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена.

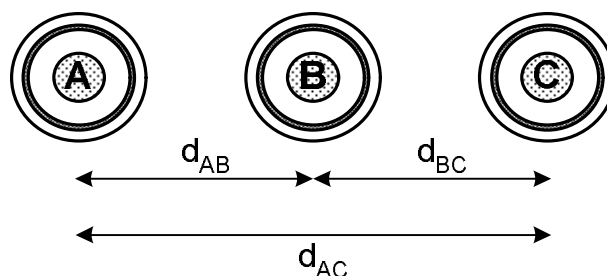


Рис.2. Расположение однофазных кабелей в ряд.

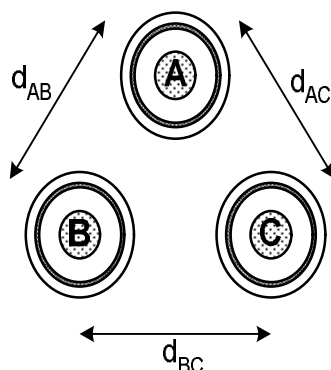


Рис.3. Расположение однофазных кабелей в вершинах равностороннего треугольника.

Среднее расстояние s между осями соседних фаз можно вычислить по формулам табл.1. Иногда расстояние s может принимать различные значения для разных участков трассы кабеля, то уменьшаясь, то увеличиваясь – в подобных ситуациях важно среднее по трассе значение s .

Табл.1. Среднее геометрическое расстояние между однофазными кабелями.

$s = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{BC} \cdot d_{AC}} = \sqrt[3]{2} \cdot d_{AB} = 1.26 \cdot d_{AB}$	Рис.2
$s = d_{AB} = d_{BC} = d_{AC}$	Рис.3

Высокий уровень напряжения жилы кабеля приводит к необходимости использования металлического экрана (рис.1). Основным назначением экрана является обеспечение равномерности электрического поля, воздействующего на главную изоляцию кабеля (изоляцию «жила-экран»), что достигается только в случае заземления экрана (хотя бы в одной точке). Заземление экрана наиболее удобно выполнять по концам кабеля, где экран выводится из концевых муфт и может быть присоединен к имеющемуся заземляющему устройству.

Заземление экранов хотя бы на одном конце кабеля уже приводит к тому, что при повреждении изоляции «жила-экран» самого кабеля в его экранах могут протекать токи промышленной частоты, равные току короткого замыкания сети. Поэтому сечение экрана всегда должно быть согласовано с величиной и длительностью протекания тока короткого замыкания.

Заземление экранов одновременно в обоих концах кабеля (рис.4) приводит к проявлению специфической особенности однофазных кабелей: наведению в экранах значительных продольных токов промышленной частоты, связанных со взаимной индуктивностью между жилой и экраном. Потери мощности, создаваемые токами в экранах, снижают пропускную способность кабеля, серьезно зависят от сечения экрана и поэтому должны учитываться при проектировании.

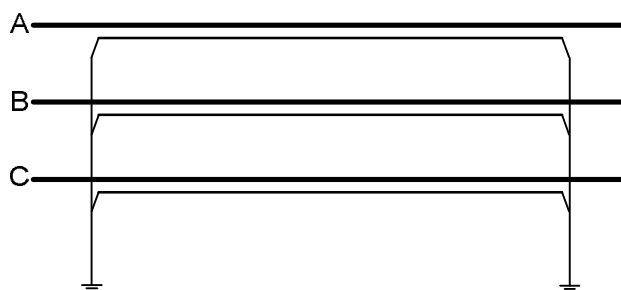


Рис.4. Заземление экранов однофазных силовых кабелей в двух его концах.

Токи в экране за счет взаимной индуктивности между жилой и экраном

Индуктивный механизм появления токов в экранах связан с наличием тока в жиле кабеля и, поэтому, проявляет себя только для нагруженного кабеля. Суть индуктивного механизма заключается в том, что магнитное поле, вызванное током жилы, наводит на экран продольное напряжение. Если экраны фаз кабеля соединены (заземлены) в обоих концах кабеля (рис.4), то наведенное напряжение приводит к появлению в экранах фаз продольных токов.

На самом деле помимо индуктивного механизма появления токов в экранах есть еще и емкостный механизм, который связан с наличием фазного напряжения сети, приложенного к изоляции «жила-экран». Это напряжение приводит к протеканию между жилой и экраном тока, величина которого ограничена емкостным сопротивлением изоляции «жила-экран» и, как правило, составляет единицы ампер даже для кабелей большой длины. Такой ток, попав из жилы в экран, стекает с экрана в его заземляющее устройство, вне зависимости от того, нагружен ли кабель или является холостым. Емкостные токи, протекающие по экрану, вследствие своей малости не представляют опасности для кабеля и практически не увеличивают его температуры.

Величины токов, индуктированных в экранах кабеля, могут быть сопоставимы с током в жиле, т.е. могут составлять десятки и сотни ампер, что несравненно более опасно, нежели единицы ампер емкостного тока. Индуктированные токи в экранах, заземленных по концам кабеля, возникают только при наличии токов в жилах, т.е.:

- в нормальном режиме работы сети;
- в аварийном режиме работы сети: однофазное, трехфазное и другие виды повреждения изоляции сети вне кабеля.

В различных режимах величины индуктированных токов в экранах могут быть определены по методике [1] или с использованием специально созданной для этих целей компьютерной программы «ЭКРАН». Здесь же ограничимся лишь простой оценкой потерь в экранах, существующих в схеме рис.4 в нормальном режиме.

Активные сопротивления жилы $R_{ж}$ и экрана $R_{э}$ по [1]

$$R_{ж} = L_{к} \cdot \frac{I_{ж}}{F_{ж}},$$
$$R_{э} = L_{к} \cdot \frac{I_{э}}{F_{э}},$$

где L_K – длина кабеля; $r_{ж}$ и $r_{э}$ – удельное сопротивление материала жилы и экрана; $F_{ж}$ и $F_{э}$ – сечения жилы и экрана.

Суммарные потери в однофазном кабеле могут быть оценены из выражения:

$$P_{сум} = P_{ж} + P_{э} + P_{дизэл} ,$$

где $P_{ж} = I_{ж}^2 R_{ж}$, $P_{э} = I_{э}^2 R_{э}$ – потери от тока в жиле и экране соответственно, $P_{дизэл} = (U_{НОМ} / \sqrt{3})^2 \cdot wC \cdot tg d$ – потери в диэлектрике (емкости C) от фазного рабочего напряжения $U_{НОМ} / \sqrt{3}$, которыми для современных кабелей с твердой изоляцией можно пренебречь вследствие малости тангенса угла диэлектрических потерь $tg d$.

В [1] показано, что соотношение потерь в экране и потерь в жиле для случая заземления экрана по концам кабеля (рис.4) вне зависимости от длины кабеля

$$\frac{P_{э}}{P_{ж}} = \frac{R_{э} / R_{ж}}{\left[1 + \left(\frac{R_{э}}{X} \right)^2 \right]}, \quad (1)$$

где $X \approx wL_K \frac{m_0}{2p} \ln \left(\frac{2s}{d_{э}} \right)$ – взаимное индуктивное сопротивление между жилой и экраном (Ом); $d_{э}$ – средний диаметр экрана кабеля (м); s – среднее расстояние между осями соседних фаз кабеля (м); $m_0 = 4p \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; $w = 2pf$, $f = 50$ Гц; $p = 3.1415$ – число «Пи». Диаметр экрана $d_{э}$ можно оценить как $d_{э} = d - 2\Delta_{об}$, где d – внешний диаметр кабеля по каталогу, $\Delta_{об}$ – толщина оболочки экрана, которая для кабелей 6-220 кВ составляет около $(5 \div 6) \cdot 10^{-3}$ м.

Величина $P_{э} / P_{ж}$ позволяет оценить вклад паразитных потерь экранов в нагрев кабеля и является важным критерием при проектировании кабельных передач. При расчете этого критерия следует учитывать, что экран кабеля выполняется из меди, а жила – из меди или алюминия (табл.2).

Табл.2. К расчету (1) соотношения потерь в экране и жиле однофазного кабеля.

Материал жилы	Преобразование для (1)
Медь $r_{ж} / r_{э} = 1.0$	$R_{э} / R_{ж} = F_{ж} / F_{э}$
Алюминий $r_{ж} / r_{э} = 1.6$	$R_{э} / R_{ж} = 0.625 \cdot F_{ж} / F_{э}$

Формула (1), полученная аналитически на основе опубликованной методики [1], совпадает с формулой п. 2.3.1, приведенной в международном стандарте МЭК [2]. Из формулы (1) следует, что эффективного снижения паразитных потерь в экранах можно добиться, прокладывая фазы кабеля сомкнутым треугольником (рис.5), так как в этом случае достигается минимальное $s / d_{э}$, а значит и X .

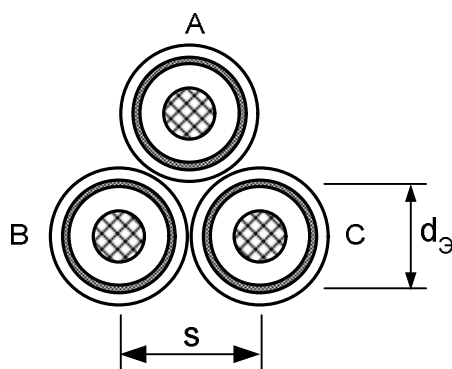


Рис.5. Прокладка трехфазной группы однофазных кабелей в виде сомкнутого треугольника.

При заданном токе в жиле и, следовательно, известном напряжении, наводимом на экран, рост сечения экрана $F_э$ (снижение его сопротивления $R_э$) приводит к росту тока в экране $I_э$. Поскольку потери в экране $P_э = I_э^2 R_э$ зависят в большей степени от тока $I_э$, чем от сопротивления $R_э$, то рост сечения экрана приводит к увеличению потерь $P_э/P_ж$ и снижению пропускной способности кабеля. Разумеется, все это справедливо только при схеме соединения экранов рис.4, в противном случае токов в экранах не будет.

Итак, в нормальном режиме ощутимо наличие токов в экранах и связанных с ними электрических потерь мощности, которые влияют на тепловой режим работы кабеля и его пропускную способность. Наличие паразитных потерь в экранах не дает права нагружать кабель так сильно, как это можно было бы делать при их отсутствии. Иными словами, потери в экранах приводят к недоиспользованию пропускной способности кабеля. Кроме того, потери в экранах необходимо оплачивать в течение всего срока службы кабеля.

Как следует из (1), приемлемое соотношение $P_э/P_ж \leq 0.1 \div 0.2$ характерно лишь при малых величинах $F_э$, $F_ж/F_э$, $s/d_э$, т.е. для «тонких» кабелей (сечение жилы до $F_ж \leq 400 \text{ мм}^2$, сечение экрана $F_э \leq 50 \text{ мм}^2$), проложенных сомкнутым треугольником. В остальных случаях требуется внедрять различные способы радикальной борьбы с токами в экранах, среди которых следует отметить:

- разземление экранов на одном из концов (рис.6);
- транспозицию экранов (рис.7).

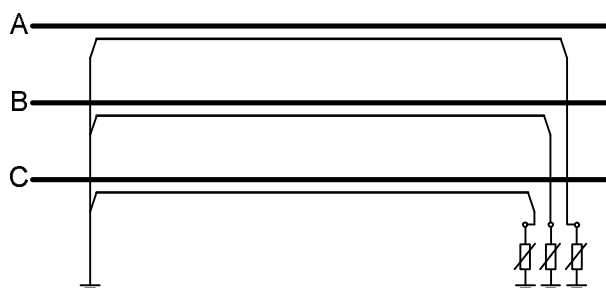


Рис.6. Заземление экранов однофазных кабелей только в одном из его концов.

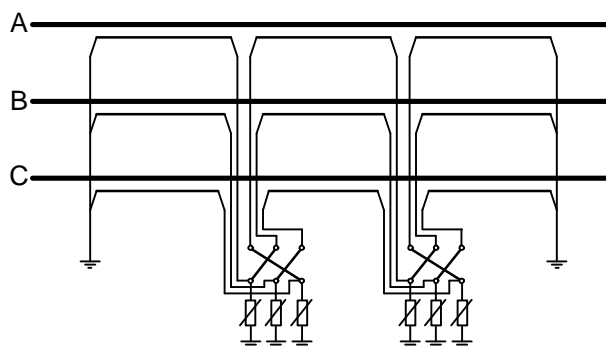


Рис.7. Заземление экранов однофазных силовых кабелей в двух его концах и одновременное применение транспозиции экранов.

В схемах рис.6-7 показаны ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН). Необходимость их применения не зависит от величины напряжения промышленной частоты на экранах относительно земли, а обусловлена исключительно вопросами защиты изоляции (оболочки) экрана от импульсных перенапряжений, передаваемых с главной изоляции кабеля [3].

Серьезным фактором, сдерживающим применение показанных на рис.6-7 технических решений, было отсутствие в России производства соответствующих электромонтажных коробок с ОПН. Зарубежные фирмы силовых кабелей изготавливали подобные коробки за пределами России и предлагали их лишь совместно со своей кабельной продукцией, не говоря о стоимости коробок и больших сроках поставок. Однако в настоящее время уже появились отечественные запатентованные конструкции (рис.8-9 и др.), снижающие нежелательную зависимость от импорта.



Рис.8. Внешний вид одной из однофазных концевых коробок с ОПН отечественного производства (для реализации схемы рис.6).



Рис.9. Внешний вид одной из трехфазных коробок транспозиции с ОПН отечественного производства (для реализации схемы рис.7).

Токи в экране при повреждении изоляции кабеля

Было показано, что в нормальном режиме, если не приняты радикальные меры по борьбе с токами в экранах, повышение сечения экрана приводит к снижению пропускной способности кабеля вследствие увеличения нагрева экрана и изоляции кабеля паразитными потерями мощности. Однако применять кабели с экранами малого сечения мешает необходимость обеспечивать термическую стойкость при протекании в экранах больших токов, возникающих в различных аварийных режимах:

- при коротких замыканиях непосредственно в кабеле (в таком случае ток в экране оказываются равным току в жиле);
- при коротких замыканиях в сети за кабелем (в таком случае ток в заземленном по концам экране индуктируется из-за тока жилы, т.е. оказывается по величине меньше тока жилы).

Разумеется, в аварийных режимах наибольшие токи в экранах появляются именно при коротких замыканиях в самом кабеле. При внутреннем повреждении изоляции «фаза-экран» кабеля вне зависимости от способа соединения экранов (рис.4,6,7) ток короткого замыкания $I_{КЗ}$ из жилы попадает в экран и далее в заземляющее устройство экрана, т.е. протекает по экрану. Если сечение экрана F_{Σ} не соответствует величине тока $I_{КЗ}$ и длительности его протекания, то возможно термическое разрушение экрана на значительном по длине L отрезке кабеля.

Короткие замыкания в начале или в конце кабеля могут сопровождаться протеканием в экранах различных токов. Например, если сеть радиальная, то короткое замыкание вблизи от нагрузки сопровождается протеканием в экранах меньших по величине токов, нежели при коротком замыкании вблизи от центра питания. При выборе сечения экрана кабеля и проверке его термической

стойкости необходимо ориентироваться на большее из двух значений токов короткого замыкания.

Традиционно в сетях рассматриваются различные виды коротких замыканий: $K(1)$, $K(1,1)$, $K(2)$, $K(3)$. Говоря о коротком замыкании в однофазном кабеле и выборе сечения экрана, полагается повреждение изоляции «жила-экран». Следовательно, так как экран заземлен, двухфазное без земли короткое замыкание $K(2)$ внутри кабеля принципиально невозможно. Крайне маловероятным является трехфазное повреждение изоляции кабеля $K(3)$, и его также следует исключить из рассмотрения.

Из двух оставшихся видов повреждения изоляции кабеля однофазное $K(1)$ является расчетным при выборе сечения экрана в сетях с заземленной нейтралью (110 кВ и выше), поскольку в сетях с изолированной нейтралью (6-35 кВ) оно сопровождается протеканием лишь емкостных токов.

В сетях с изолированной нейтралью расчетным при выборе сечения экрана является двойное повреждение изоляции $K(1,1)$, причем наиболее вероятным является повреждение изоляции двух фаз различных присоединений, как это показано на рис.10 Рассмотренная на рис.10 ситуация обычно развивается следующим образом: происходит однофазное замыкание одной из фаз в точке А и под воздействием перенапряжений на «здоровых» фазах в другом месте происходит повреждение одной из «здоровых» фаз (точка В).

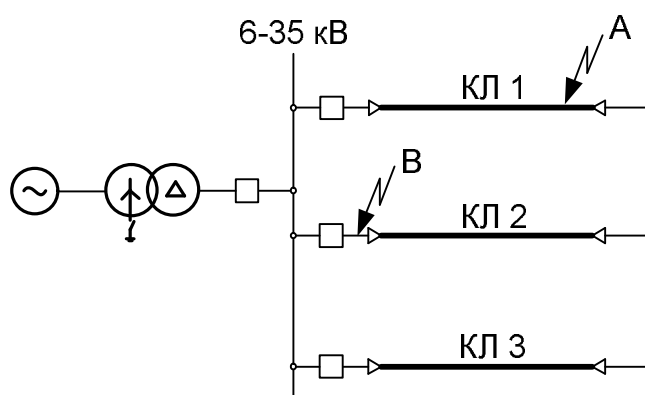


Рис.10. Двойное повреждение изоляции $K(1,1)$ в кабельной сети с изолированной нейтралью.

На рис.11 показаны направления протекания токов короткого замыкания в случаях $K(1)$ и $K(1,1)$. Для рис.11,а в контуре с током действует эдс фазы «А»; для рис.11,б в контуре с током действует разность эдс фаз «А» и «В», т.е. линейное напряжение сети, однако оно приложено к контуру с повышенным сопротивлением. Поэтому при $K(1)$ в сети с заземленной нейтралью и $K(1,1)$ с изолированной нейтралью будут разные величины токов короткого замыкания $I_{жА}$, но сами процессы в КЛ-1, имеющей внутреннее повреждение изоляции, идентичны.

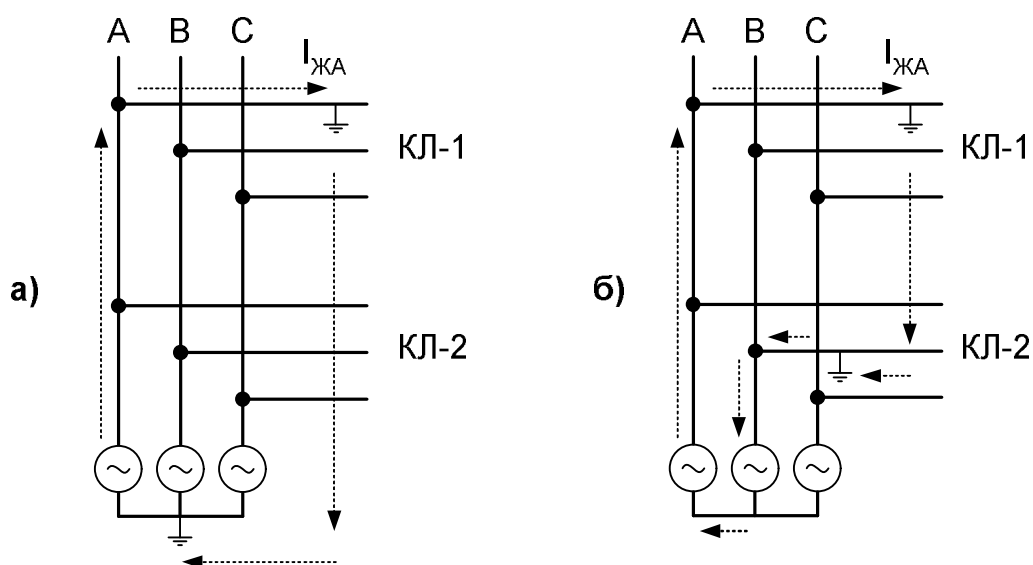


Рис.11. Процессы при повреждениях изоляции: при К(1) в сетях с заземленной нейтралью (а) и при К(1,1) в сетях с изолированной нейтралью (б).

Поскольку в схеме рис.11,б повреждения КЛ-1 и КЛ-2 могут быть на произвольном удалении от сборных шин, то величина тока двойного замыкания на землю К(1,1) может варьироваться в широком диапазоне значений. Наибольшие токи двойного замыкания на землю К(1,1) возникают, когда оба повреждения в сети находятся вблизи друг от друга и вблизи от центра питания (сборных шин). В такой ситуации величины токов К(1,1) сопоставимы с токами трехфазного короткого замыкания К(3). Именно поэтому в сетях 6-35 кВ иногда, выбирая сечение экрана, оперируют токами трехфазного короткого замыкания, хотя на самом деле повреждение трех фаз кабеля маловероятно.

Итоговые расчетные случаи для выбора сечения экранов содержатся в табл.3 и никак не зависят от способа соединения (заземления) экранов.

Табл.3. Основные расчетные случаи для выбора сечения экрана.

Кабель	Расчетный случай
6-35 кВ	Двойное К(1,1) (одно из двух повреждений изоляции находится в рассматриваемом кабеле)
110-500 кВ	К(1) (повреждение изоляции находится в рассматриваемом кабеле)

Выбор сечения экрана

Выбор сечения экрана в соответствии с табл.3 при типовых значениях токов двойного (в сети с изолированной нейтралью) и однофазного (в сети с заземленной нейтралью) коротких замыканий приводит к тому, что в сетях 6-35 кВ склоняются к повсеместному использованию кабелей с сечением экрана $F_э \geq 70 \text{ мм}^2$, а в сетях 110-500 кВ – сечение экрана достигает $F_э = 185 \text{ мм}^2$ и более.

Столь большие сечения экранов согласно (1) делают нежелательной, а в сетях 110-500 кВ и вовсе недопустимой схему соединения экранов рис.4 вследствие чрезмерных потерь в экранах в нормальном установившемся режиме. Именно поэтому в сетях 110-500 кВ «разземление экранов» для очень коротких кабелей (конкретные длины – программа «ЭКРАН») и «транспозиция экранов» (в остальных случаях) являются незаменимыми техническими решениями.

В сетях 6-35 кВ широкое применение «транспозиции экранов» затруднено в силу экономических причин, а «разземление экранов» может быть использовано лишь для относительно коротких кабелей (конкретные длины – программа «ЭКРАН»). Согласно (1) возможность отказа от неудобных для повсеместного использования «разземления экранов» и «транспозиции экранов» появится только для «тонких» кабелей, когда сечение экрана не будет превосходить $F_э = 50 \text{ мм}^2$ и одновременно с этим требуемое для питания нагрузки сечение жилы будет менее $F_ж = 400 \text{ мм}^2$. Для обеспечения $F_э \leq 50 \text{ мм}^2$ в сети 6-35 кВ следует рекомендовать:

- ограничить токи короткого замыкания;
- не заниматься поэтапным ретрофитом, а строить новые надежные сети, в которых переход однофазного повреждения к многофазным повреждениям является исключительным событием;
- в ряде мест перейти от традиционной для России изолированной (компенсированной) нейтрали к заземлению нейтрали через низкоомное сопротивление (это позволит быстро находить и отключать присоединения с однофазными повреждениями, исключая переход к многофазным).

Применение в сетях 6-35 кВ «скрутки» экранов, представляющее собой периодическое объединение экранов фаз кабеля в специальных соединительных муфтах, является малоэффективным, что показано в [1].

Выводы

1. Сечение экранов в сетях 110-500 кВ с заземленной нейтралью следует выбирать в соответствии с рекомендациями изготовителей кабелей в расчете на весь ток однофазного короткого замыкания $K(1)$.
2. Сечение экранов в сетях 6-35 кВ с изолированной (компенсированной) нейтралью следует выбирать в соответствии с рекомендациями изготовителей кабелей в расчете на ток двойного короткого замыкания $K(1,1)$.
3. При выборе сечения экрана необходимо учитывать, что в нормальном режиме в заземленных по концам экранах однофазных силовых кабелей 6-500 кВ существуют заметные паразитные потери мощности $P_э$. Соотношение $P_э / P_ж$ паразитных потерь мощности в экранах и неизбежных потерь мощности в жилах кабеля:
 - никак не зависит от длины кабеля;
 - снижается при прокладке фаз сомкнутым треугольником;
 - увеличивается с ростом сечения жилы $F_ж$;
 - увеличивается с ростом сечения экрана $F_э$.

4. Даже при прокладке сомкнутым треугольником паразитные потери в кабелях с сечением жилы $F_{ж} > 400 \text{ мм}^2$ или сечением экрана $F_{э} > 50 \text{ мм}^2$ уже ощутимо снижают пропускную способность кабеля вне зависимости от его длины и класса напряжения. В таких случаях в сетях 6-35 кВ и 110-500 кВ требуется применение мер радикальной борьбы с потерями в экранах: «транспозиции экранов» или «одностороннего заземления экранов».
5. В сетях 110-500 кВ сечения экранов $F_{э}$, выбранные исходя из токов однофазного короткого замыкания, и сечения жил $F_{ж}$, выбранные исходя из величины нагрузки, таковы, что по соображениям нормального режима без «транспозиции экранов» или их «одностороннего заземления» эксплуатация кабеля недопустима!
6. В сетях 6-35 кВ, как правило, сечения жил $F_{ж}$ меньше, чем в сетях 110-500 кВ. Поэтому при нежелательности использования «транспозиции экранов» или «разземления экранов» иногда достаточно снизить сечение экрана $F_{э}$, что оказывается возможным при выполнении хотя бы одной из следующих рекомендаций:
 - ограничить токи короткого замыкания $K(1,1)$;
 - исключить $K(1,1)$ как расчетный случай выбора сечения экрана, т.е. использовать низкоомное заземление нейтрали, строить новые надежные сети.

Литература

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. –СПб.: Изд-во “ЗЭУ”, 2008. –104 с. (<http://www.ruscable.ru/press/books.html>).
2. МЭК 60287-1-1 (2006 г.) Кабели электрические. Расчет номинального тока. Часть 1-1. Уравнения номинальных токовых нагрузок (при 100%-ном коэффициенте нагрузок) и расчет потерь. Общие положения.
3. Дмитриев М.В. Перенапряжения на изоляции экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ и защита от них//«КАБЕЛЬ-news», №11, 2008.–с.56-62.