

Потери в экранах однофазных силовых кабелей 6-500 кВ и эффективность транспозиции экранов

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

В предыдущих номерах журнала [1-2] уже обсуждались вопросы обустройства экранов трехфазных групп однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. По крайней мере в сетях 110 кВ и выше положение с проектированием и строительством кабельных передач существенно улучшилось, однако, к сожалению, многие вопросы до сих пор трактуются неверно, приводя к ошибочным техническим решениям. В новой статье, предлагаемой читателям, дан ряд разъяснений по потерям в экранах однофазных силовых кабелей, по вопросам транспозиции экранов.

1. Источники потерь в однофазном кабеле

На рис.1 упрощенно показана конструкция однофазного силового кабеля, включающего жилу, экран, главную изоляцию (между жилой и экраном), а также оболочку экрана.

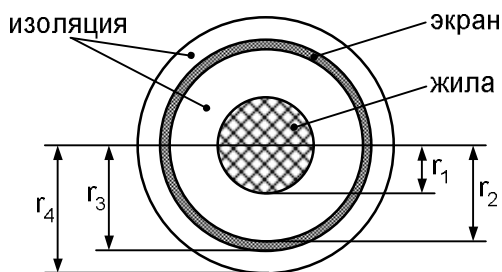


Рис.1. Современный однофазный кабель 6-500 кВ.

Активные сопротивления жилы $R_{ж}$ и экрана $R_{э}$ по [1-3]

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

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

где $L_{к}$ – 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:

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

где $P_{ж} = I_{ж}^2 R_{ж}$, $P_{э} = I_{э}^2 R_{э}$ – потери от тока в жиле и экране соответственно, $P_{диэл} = (U_{ном} / \sqrt{3})^2 \cdot \omega C \cdot \text{tg}d$ – потери в диэлектрике (емкости C) от фазного рабочего напряжения $U_{ном} / \sqrt{3}$, которыми для современных кабелей с твердой

изоляция можно пренебречь вследствие малости тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

Отношение паразитных потерь в экране кабеля и неизбежных потерь в жиле несложно определить как

$$\frac{P_{\text{э}}}{P_{\text{ж}}} = \left(\frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{ж}}} \right)^2 \cdot \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{ж}}} \cdot \frac{F_{\text{ж}}}{F_{\text{э}}}. \quad (1)$$

Измерения для трехфазной группы однофазных кабелей 630/35 мм² класса 35 кВ, питающих один из металлургических комбинатов, показали, что при токе в жилах $I_{\text{ж}} = 900$ А, который согласно каталогу был допустим для кабеля, ток в заземленных по концам экранах (рис.2,а) составлял $I_{\text{э}} = 300$ А. Для этого кабеля, имевшего медную жилу и экран $r_{\text{ж}} = r_{\text{э}} = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (медь), соотношение потерь (1) будет $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} \approx 2$. Столь большие паразитные потери в экране привели к впадению экрана в изоляцию кабеля, т.е. к повреждению кабеля.

Для кабеля 10 кВ из [2-3] $F_{\text{ж}} = 500$ мм², $F_{\text{э}} = 95$ мм², $r_{\text{ж}} = r_{\text{э}} = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (медь), $I_{\text{ж}} = 186$ А, $I_{\text{э}} = 115$ А, имеем примерно такое же соотношение потерь в экране и жиле, как для кабеля 35 кВ 630/35.

Расчеты и опыт эксплуатации показывают, что если не принимать меры по исключению длительного протекания токов в экранах, наводимых током жилы, то серьезным источником потерь в кабеле являются потери в его экране – они могут до нескольких раз превосходить потери в жиле.

Согласно [1-3] сопротивление кабеля по прямой последовательности при заземлении экранов с двух сторон (схема рис.2,а)

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = (\underline{Z}_{\text{ж}} - \underline{Z}_{\text{к}}) - \frac{(\underline{Z}_{\text{жэ}} - \underline{Z}_{\text{к}})^2}{\underline{Z}_{\text{э}} - \underline{Z}_{\text{к}}},$$

откуда с учетом формул [1-3] для сопротивлений \underline{Z} можно найти

$$R_1 = R_{\text{ж}} + \frac{R_{\text{э}}}{1 + \left(\frac{R_{\text{э}}}{X} \right)^2}, \quad (2)$$

где $X = wL_{\text{к}} \frac{m_0}{2p} \left[\ln \left(\frac{D_3}{r_2} \right) - \ln \left(\frac{D_3}{s} \right) \right] = wL_{\text{к}} \frac{m_0}{2p} \ln \left(\frac{s}{r_2} \right) \approx wL_{\text{к}} \frac{m_0}{2p} \ln \left(\frac{2s}{d_3} \right)$; d_3 – средний диаметр экрана кабеля (он незначительно больше удвоенного внутреннего радиуса экрана $2r_2$), s – среднее расстояние между осями соседних фаз кабеля.

Потери в одной фазе кабеля составят $P_{\text{сум}} = P_{\text{ж}} + P_{\text{э}} = I_{\text{ж}}^2 R_1$, а в трех фазах они будут $3 \cdot P_{\text{сум}}$. Как это и должно быть, потери в нормальном симметричном режиме работы определяются активным сопротивлением прямой последовательности R_1 и током в жиле $I_{\text{ж}}$.

Из выражения (2) видно, что, к сожалению, потери в однофазных силовых кабелях вызваны не только потерями в жиле, имеющей сопротивление $R_{\text{ж}}$, но и паразитными потерями в экранах (второе слагаемое формулы). Одностороннее разземление экранов кабеля (рис.2,б) или транспозиция экранов кабеля (рис.2,в) позволяют исключить потери в экранах и достичь желаемого случая $R_1 = R_{\text{ж}}$,

когда потери в кабеле определяются только сопротивлением жилы (ее сечением $F_{ж}$ и ее материалом $r_{ж}$).

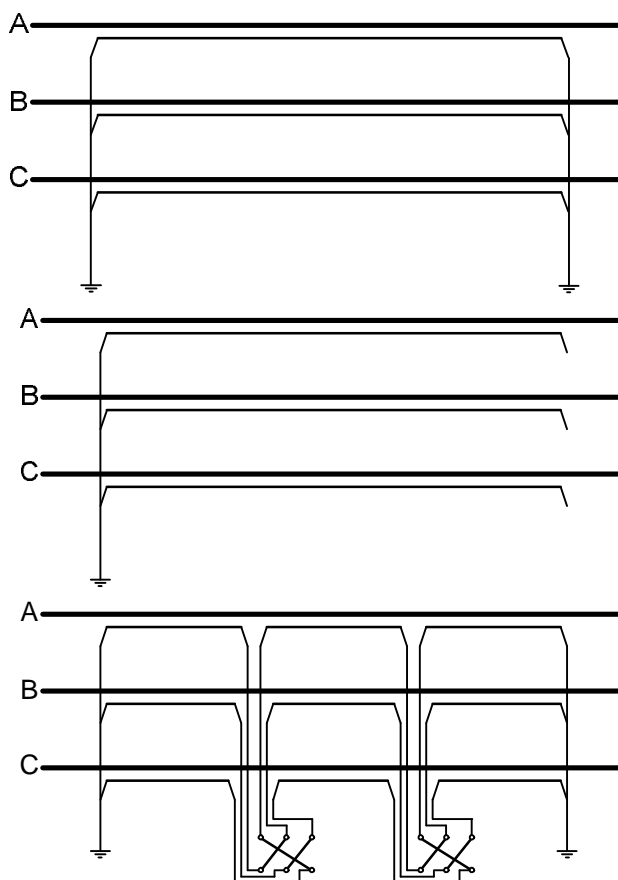


Рис.2. Типовые схемы соединения экранов группы из трех однофазных кабелей:

- а – экраны заземлены с двух сторон;
- б – экраны заземлены с одной стороны;
- в – экраны заземлены с двух сторон и транспонированы.

Определим соотношение потерь в экране и потерь в жиле для случая заземления экрана по концам кабеля (рис.2,а)

$$\frac{P_{\text{э}}}{P_{\text{ж}}} = \frac{R_{\text{э}} / R_{\text{ж}}}{\left[1 + \left(\frac{R_{\text{э}}}{X} \right)^2 \right]}, \quad (3)$$

где в качестве $R_{\text{э}}$ и X можно подставлять как значения на единицу длины (Ом/м), так и полные значения (Ом) для кабеля длиной $L_{\text{к}}$.

Формула (3), полученная аналитически на основе опубликованной методики [1-3], совпадает с формулой п. 2.3.1, приведенной в международном стандарте МЭК [4]. К сожалению, в МЭК дано лишь конечное выражение без его обоснования, однако совпадение независимых исследований [1-3] с мнением МЭК дает нам еще больше оснований считать состоятельной предлагаемую методику расчета токов и напряжений, хотя она и без того уже неоднократно подтверждалось сравнением расчетов с результатами реальных измерений на действующих кабелях.

Для всех однофазных кабелей вне зависимости от класса их номинального напряжения, из (3) следует, что эффективного снижения паразитных потерь в экранах можно добиться, прокладывая фазы кабеля сомкнутым треугольником (рис.3), так как в этом случае достигается минимальное $s/d_{\text{э}}$, а значит и X .

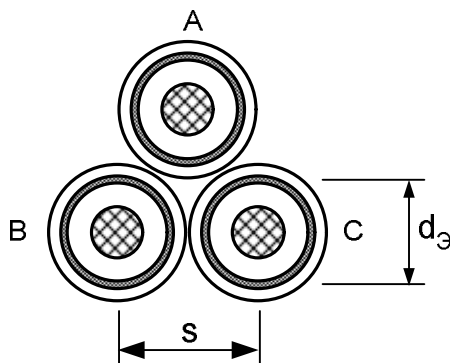
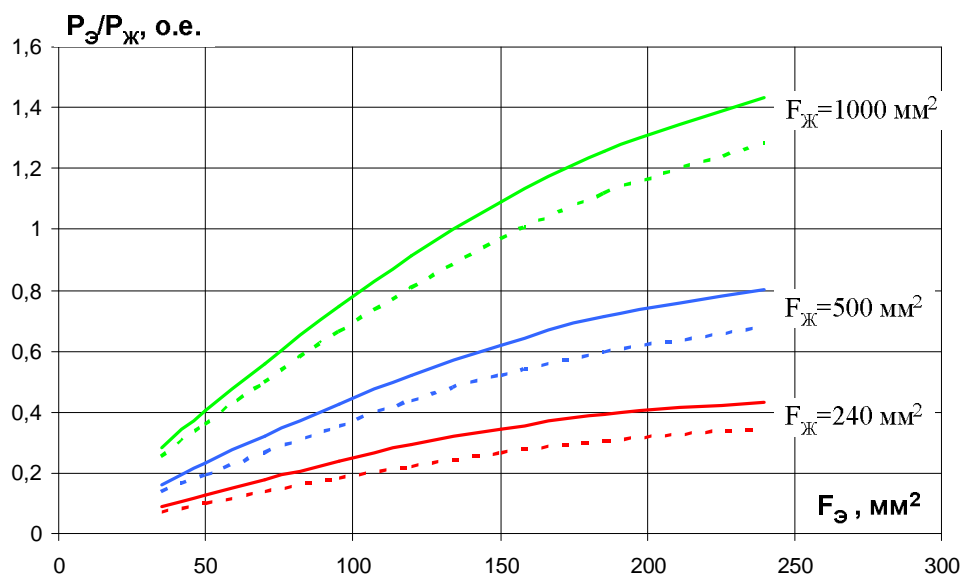


Рис.3. Прокладка трехфазной группы однофазных кабелей в виде сомкнутого треугольника.

Величина $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$ является важным критерием выбора способа обустройства экрана. При расчете этого критерия следует учитывать, что экран кабеля выполняется из меди, а жила – из меди или алюминия (табл.1). При прокладке сомкнутым треугольником ($s/d_{\text{э}} \rightarrow 1$) результаты расчетов потерь $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$ по формуле (3) для некоторых типовых сечений $F_{\text{ж}}$ медной или алюминиевой жилы приведены на рис.4, данные которого никак не зависят от длины кабеля.

Табл.1. Соотношение потерь в экране и жиле однофазного кабеля (рис.2,а).

Материал жилы	Преобразование для (3)	Расчет по (3)
Медь $r_{\text{ж}}/r_{\text{э}} = 1.0$	$R_{\text{э}}/R_{\text{ж}} = F_{\text{ж}}/F_{\text{э}}$	Рис.4,а
Алюминий $r_{\text{ж}}/r_{\text{э}} = 1.6$	$R_{\text{э}}/R_{\text{ж}} = 0.625 \cdot F_{\text{ж}}/F_{\text{э}}$	Рис.4,б



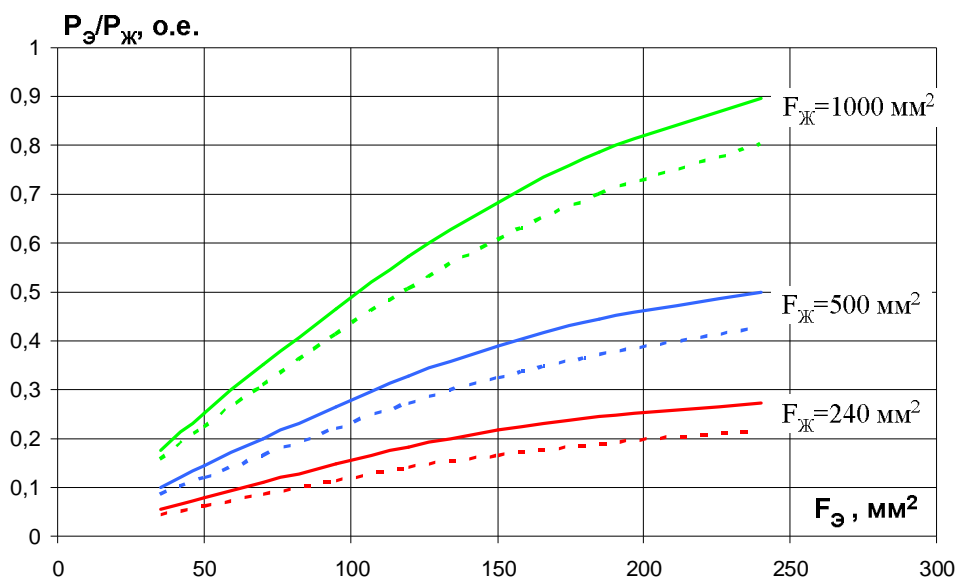


Рис.4. Источники потерь в кабеле 6-500 кВ произвольной длины, проложенном сомкнутым треугольником, в зависимости от сечений жилы $F_{\text{ж}}$ и экрана $F_{\text{э}}$, заземленного по концам кабеля. Сплошная линия – кабель 10 кВ, пунктирная линия – кабель 110 кВ.
 а – медная жила;
 б – алюминиевая жила.

Согласно рис.4 для всех однофазных кабелей вне зависимости от класса их номинального напряжения и длины, следует, что паразитные потери в экране кабеля могут быть сопоставимы с потерями в жиле. При заданном сечении жилы $F_{\text{ж}}$ рост паразитных потерь и снижение пропускной способности кабеля происходит с увеличением сечения экрана $F_{\text{э}}$.

При заданном токе в жиле и, следовательно, известной продольной эдс, наводимой на экран, рост сечения экрана $F_{\text{э}}$ (снижение его сопротивления $R_{\text{э}}$) приводит к росту тока в экране $I_{\text{э}}$. Поскольку потери в экране $P_{\text{э}} = I_{\text{э}}^2 R_{\text{э}}$ зависят в большей степени от тока $I_{\text{э}}$, чем от сопротивления $R_{\text{э}}$, то рост сечения экрана все же приводит к увеличению потерь $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$, что и видно на рис.4.

Как следует из (3) и рис.4, приемлемое соотношение $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$ характерно лишь при малых величинах $F_{\text{э}}$, $F_{\text{ж}}/F_{\text{э}}$, $s/d_{\text{э}}$, т.е. для «тонких» кабелей, проложенных сомкнутым треугольником.

В силу различных причин в настоящее время в сетях 6-35 кВ склоняются к повсеместному использованию кабелей с сечением экрана $F_{\text{э}} \geq 70$ мм², а в сетях 110 кВ и выше – сечение экрана достигает $F_{\text{э}} = 185$ мм² и более. Это означает, что разработка и внедрение мер по борьбе с потерями в экранах является жизненно необходимым вопросом, решение которого должно быть закреплено незамедлительно, особенно в сетях 110-500 кВ.

Отечественные и зарубежные кабельные заводы приводят длительно допустимую нагрузку однофазных кабелей лишь в зависимости от сечения жилы $F_{\text{ж}}$, не давая никакой зависимости от сечения экрана $F_{\text{э}}$, серьезно влияющего на потери в кабеле и его температуру: ясно, что потери в экранах или вовсе не

учтены, или учтены ненадлежащим образом. Следовательно, указанные в каталогах нагрузки можно использовать только в случае одностороннего заземления экрана или его транспозиции. В случае двустороннего заземления экранов каталожные данные не соответствуют действительности, являясь завышенными.

Если по расчетам потери в экранах $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$ относительно невелики и не превосходят $0.1 \div 0.2$, то особой опасности для кабеля нет – его можно нагружать до тех токов, которые приводятся в каталогах. Хотя в подобных случаях в сети все равно имеется источник паразитных потерь, которые кто-то оплачивает.

Если по расчетам $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} > 0.2$, то при загрузке кабеля в соответствии с данными каталогов существует реальная опасность сокращения срока службы кабеля за счет длительного перегрева его изоляции сверх допустимых температур, не говоря уже о стоимости потерь мощности. Последствия перегрева изоляции несколько ослабляются, если нагрузка кабеля носит переменный характер.

Анализ рис.4 показывает, что при прокладке сомкнутым треугольником приемлемым соотношением $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$ можно считать только для «тонких» кабелей, у которых сравнительно малые сечения жилы $F_{\text{ж}} < 500 \text{ мм}^2$ и экрана $F_{\text{э}} < 70 \text{ мм}^2$.

При $F_{\text{ж}} > 400 \div 500 \text{ мм}^2$ и/или $F_{\text{э}} > 50 \div 70 \text{ мм}^2$ необходимо бороться с потерями в экранах, делая это и с точки зрения снижения стоимости потерь мощности в экранах, и из-за опасности перегрева изоляции кабеля. Для этих целей следует использовать или частичное разземление экранов, или транспозицию экранов, без реализации которых эксплуатация трехфазных групп однофазных кабелей недопустима.

2. Транспозиция экранов

Самым универсальным, эффективным и безопасным способом радикального снижения паразитных потерь в однофазных кабелях является транспозиция экранов [1-3]. Для реализации транспозиции экранов необходимо наличие специальных транспозиционных муфт, которые вспомогательными кабелями соединяются с коробкой транспозиции, внутри которой осуществляется их перекрестное соединение. Существуют два основных типа транспозиционных коробок – они показаны на рис.5-6. По трассе, как правило, предусматриваются по крайней мере две транспозиционные коробки, тогда как на рис.5-6 в качестве примера приведена лишь одна из них (остальные – обустраиваются аналогично).

В условиях рис.5 из соединительной муфты каждой фазы выводятся два вспомогательных одножильных кабеля, соответствующих «левому» и «правому» участкам экрана силового кабеля: в коробку транспозиции КТ, таким образом, необходимо завести шесть одножильных кабелей. В условиях рис.6 из соединительной муфты каждой фазы выводится один вспомогательный коаксиальный кабель, жила и экран которого соответствуют «левому» и «правому» участкам экрана силового кабеля: в коробку транспозиции КТ, таким образом, необходимо завести три коаксиальных кабеля.

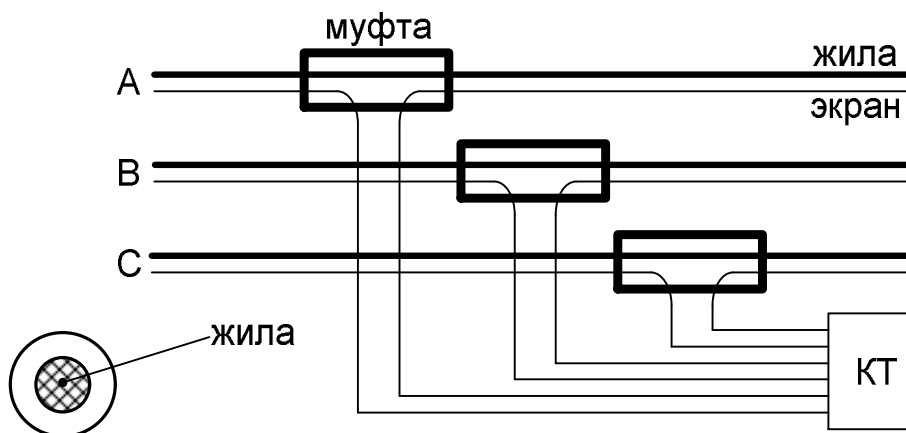


Рис.5. Коробка транспозиции КТ, в которую заводятся шесть одножильных кабелей.

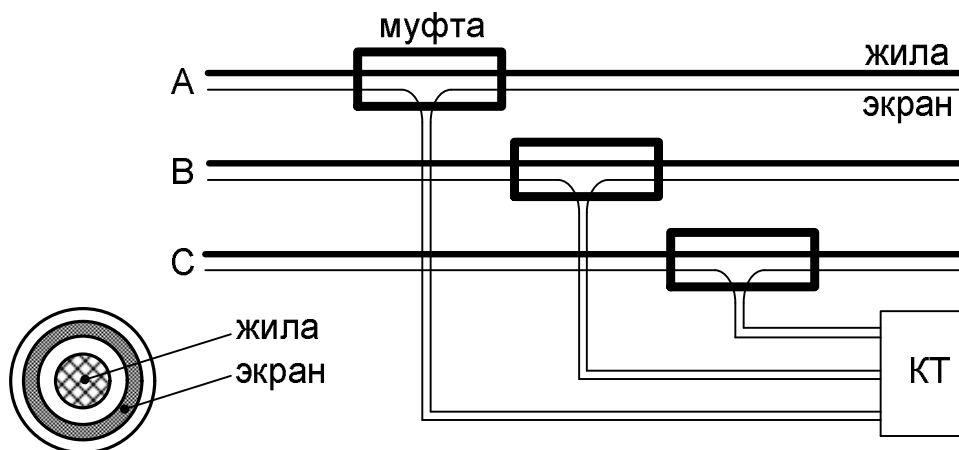


Рис.6. Коробка транспозиции КТ, в которую заводятся три коаксиальных кабеля.

Тип коробки транспозиции (число входов и внутреннее обустройство) целиком определяется типом соединительных муфт, используемых при строительстве силового кабеля. Некоторые производители транспозиционных муфт выводят «левую» и «правую» части экрана силового кабеля с помощью двух одножильных кабелей, а некоторые – одним коаксиальным кабелем с равными сечениями жилы и экрана. Это необходимо предусмотреть на стадии проектирования.

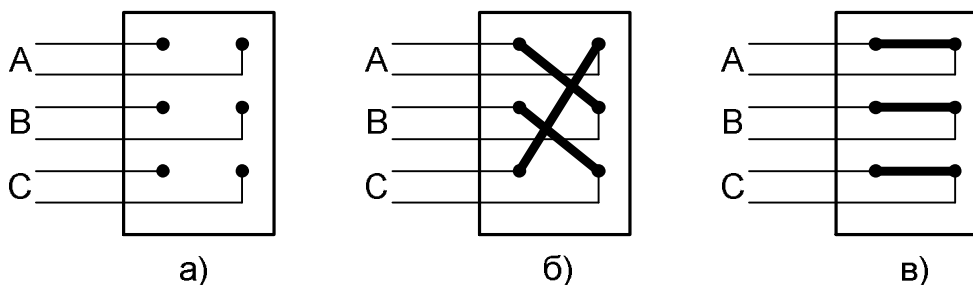


Рис.7. Соединение экранов внутри коробки транспозиции.

Внутри коробки транспозиции есть шесть опорных изоляторов, незаземленные фланцы которых можно соединять металлическими перемычками. Во время поиска повреждения внутри кабеля для локализации аварийного участка

и более точного отыскания места повреждения удобной может быть схема рис.7,а. При работе кабеля должна обеспечиваться транспозиция экранов – это достигается в схеме рис.7,б. Схема рис.7,в может потребоваться во время испытаний изоляции экрана (например, при измерении сопротивления изоляции экрана), когда важно выполнить замеры отдельно для каждой фазы кабеля сразу на всем протяжении трассы.

Как видно, в процессе эксплуатации персонал должен иметь доступ к коробке транспозиции с целью осуществления переключений перемычек, что приводит к необходимости размещения КТ в доступном для персонала месте – в колодцах транспозиции, которые представляют из себя железобетонные короба, размещаемые под землей. В колодец транспозиции можно попасть через люк, организованный в его крыше. Высота короба составляет около 2 м, а размер пола примерно 3х2 м. В таком колодце, герметизированном для предотвращения попадания воды, одновременно могут работать несколько человек. Значительные размеры колодца связаны еще и с тем, что в нем размещается не одна коробка транспозиции, а две, поскольку, как правило, кабельные линии состоят из двух цепей (на рис.5-6 показана одна цепь).

Проектировщикам следует быть осторожными, поскольку некоторые зарубежные коробки транспозиции достигают линейных размеров более 0.6 метра и после строительства колодца транспозиции не могут быть в него помещены, так как не пройдут в горловину люка. Не выбрав поставщика коробки транспозиции и, поэтому, не имея точной информации о ее размере, крышку люка следует задавать максимально большой из того, что предлагает промышленность.

До недавнего времени в отечественных кабельных сетях широкому применению транспозиции, необходимость которой не вызывает сомнения, мешала высокая стоимость и большие сроки поставок коробок, которые изготавливались только за границей. Однако в настоящее время уже появились отечественные запатентованные конструкции (рис.8 и др.), снижающие нежелательную зависимость от импорта.



Рис.8. Внешний вид одной из коробок транспозиции отечественного производства (тип КТ-6).

Заключение

1. В заземленных по концам экранах однофазных силовых кабелей 6-500 кВ существуют заметные паразитные потери мощности $P_э$.
2. Соотношение $P_э/P_ж$ паразитных потерь мощности в экранах и неизбежных потерь мощности в жилах кабеля легко определить по выражению (3), полностью согласующемуся с МЭК.
3. Соотношение $P_э/P_ж$:
 - никак не зависит от длины кабеля;
 - снижается при прокладке фаз сомкнутым треугольником;
 - увеличивается с ростом сечения жилы;
 - увеличивается с ростом сечения экрана.
4. Длительно допустимые нагрузки на однофазные кабели 6-500 кВ в каталогах многих производителей являются завышенными, так как указаны без учета паразитных потерь мощности в экранах.
5. Использование каталожных данных по нагрузкам возможно лишь при малых $P_э/P_ж$, т.е. для кабелей с сечением жилы до 400-500 мм² и сечением экрана до 50-70 мм². Когда сечение жилы и/или экрана превосходит указанные значения, вне зависимости от длины кабеля и класса его напряжения, пропускная способность кабеля оказывается заметно меньше, чем по каталогам.
6. Эффективность транспозиции экранов и других способов снижения потерь связана с повышением реальной пропускной способности кабелей 6-35 кВ и 110-500 кВ до тех значений, которые приводятся в каталогах производителей.
7. Транспозиция является универсальным и эффективным средством радикального снижения потерь в экранах однофазных кабелей 6-500 кВ. Длина кабеля никак не влияет на необходимость транспозиции, но влияет на рекомендуемое число циклов транспозиции (один, два и т.п.).
8. Наибольшая эффективность транспозиции достигается в сетях 110-500 кВ, где вследствие значительных сечений экрана паразитные потери в экранах в разы снижают пропускную способность кабеля. Поэтому в сетях 110-500 кВ для кабелей любой длины (даже длиной всего 1 км) необходима транспозиция.
9. Для коротких кабелей возможно применение неполного цикла транспозиции, что уже позволяет частично снизить потери в экранах при некоторой экономии соединительных муфт.

Литература

- [1] Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6-500 кВ//«Новости Электротехники», №2(44), 2007 г.
- [2] Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена//«Новости Электротехники», №5(47), 2007 г.
- [3] Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. –СПб.: Изд-во «НИВА», 2008. –104 с.
- [4] 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.