

Однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена получили широкое распространение и уже достаточно хорошо изучены. Некоторое время назад на рынке появилась модификация однофазных кабелей напряжением 6–35 кВ (и даже 110 кВ), в конструкцию которых добавлена броня из проволок алюминия или его сплава.

Михаил Викторович Дмитриев считает, что у бронированного кабеля имеется ряд особенностей, которые нельзя оставлять без внимания.

БРОНИРОВАННЫЕ КАБЕЛИ 6–35 кВ

Проблемы и возможные решения

Традиционно в сетях среднего напряжения применялись трехфазные кабели с бумажно-масляной изоляцией в свинцовой оболочке, покрытые броней из стальных лент. Свинцовая оболочка герметизировала кабель, защищая его от потери масла и проникновения воды, а броня предотвращала механические повреждения свинца и других элементов линии.

В настоящее время у силовых кабелей чаще всего твердая изоляция – сшитый полиэтилен (СПЭ), и поэтому герметизация кабеля при помощи свинцовой оболочки уже не требуется. Исключение составляют специализированные СПЭ-кабели для подводной прокладки, где используют свинцовую оболочку для защиты кабеля от проникновения воды внутрь изоляции.

Отсутствие свинцовой оболочки у подавляющего большинства СПЭ-кабелей повлекло за собой и отказ от применения в их конструкции металлической брони.

Кабели с изоляцией из СПЭ покрыты прочной полимерной оболочкой толщиной приблизительно 5 мм, которая не только защищает кабель от проникновения воды в его изоляцию, но и обеспечивает ему определенную механическую защиту. Тем не менее есть несколько случаев, когда требуется усиленная механическая защита кабеля, с которой полимерная оболочка может не справиться. Например, речь идет о прокладке линии:

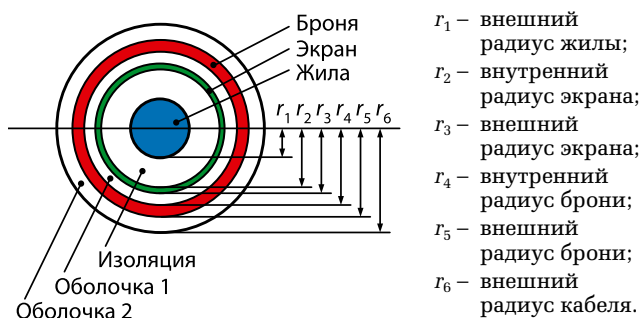
- в пучинистых грунтах;
- в зонах подвижек грунта (оползни, землетрясения и пр.);
- по дну водоемов в условиях судоходства.

Для подобных ситуаций заводы разработали модификацию СПЭ-кабелей, где в конструкцию добавлена проволочная броня из алюминия или его сплава. Кроме механической защиты уже проложенного кабеля, броня может оказаться полезна и на стадии монтажа, ведь она позволяет повысить допустимые усилия на кабель при его протяжке, а значит, увеличить строительную длину, снизить число соединительных муфт.

Бронированные СПЭ-кабели бывают трехфазными или однофазными, однако только однофазное исполнение дает возможность изготавливать кабели на большие напряжения и токи.

Схематично вид поперечного сечения однофазного бронированного кабеля 6–35 кВ представлен на рис. 1. Такой

• Рис. 1. Однофазный бронированный кабель



Михаил Дмитриев,
к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

кабель отличается от обычного тем, что оболочка делится на две части, между которыми размещается повив из проволок брони. В результате у бронированного кабеля образуется сразу две оболочки: первая (внутренняя) – между экраном и броней, вторая (наружная) – между броней и грунтом. Каждая из этих оболочек имеет толщину около 3 мм.

Принципиальным является вопрос о выборе материала для брони однофазного кабеля, поскольку за пределами медного экрана нет электрического поля (экран заземлен хотя бы в одной точке), но имеется магнитное поле. Очевидно, броня кабеля оказывается в зоне действия магнитного поля жилы кабеля и поэтому не может выполняться из склонных к намагничиванию материалов, так как иначе она будет существенно нагреваться, создавая риск перегрева и оплавления изоляции. Поэтому броню однофазных кабелей делают из немагнитного металла – алюминия или из его сплава (он имеет активное сопротивление, близкое к чистому алюминию). Конструкция брони проволочная, так как на заводах заведомо имеется необходимое оборудование для работы с проволоками, ведь и жила скручивается из отдельных проволок, и экран тоже является проволочным.

Однофазный бронированный кабель (рис. 1) имеет в отличие от обычного однофазного не один, а как бы два экрана (один медный, а второй алюминиевый). Вместе с тем известно, что даже единственный экран кабеля традиционной однофазной конструкции уже порождает большое число проблем, которые связаны с наведенными напряжением и током промышленной частоты, а также с паразитными потерями мощности [1]. Традиционно для борьбы с токами и потерями в экранах однофазных кабелей приходится оптимизировать схему их соединения и заземления. В частности, нужно отказываться от простого двустороннего заземления в пользу одностороннего (для линий небольшой длины) или же в пользу транспозиции экранов (для протяженных кабелей). Для однофазных бронированных кабелей подобные схемы соединения и заземления потребуются не только для экрана, но и для брони. Всё это снижает привлекательность бронированных кабелей 6–35 кВ.

ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ЭКРАНОВ И БРОНИ

Для экранов однофазных кабелей существуют три основные схемы соединения и заземления [1]:

- двустороннее заземление экранов;
- одностороннее заземление экранов;
- транспозиция экранов (то или иное число циклов).

Такие же три базовые схемы теоретически можно предложить и для брони. Однако далее будет показано, что для брони в отличие от экранов возможен еще и четвертый вариант – ее полное разземление. Имея 3 разные схемы для экранов и 4 схемы для брони, всего получаем 12 вариантов, которые придется рассмотреть проектировщику, чтобы выбрать самое оптимальное решение.

К сожалению, в настоящее время при выборе схем даже для обычного однофазного кабеля приходится наблюдать большое число ошибок, а ведь уже опубликованы все необходимые материалы и даже введен в действие стандарт ПАО «ФСК ЕЭС» [2].

Учитывая изложенное, есть все основания полагать, что для проектировщика, и без того заваленного работой, задача выбора наилучшей из 12 схем бронированного кабеля, имеющего два экрана, окажется достаточно сложной.

Согласно располагаемой информации, для всех однофазных бронированных кабелей, которые уже проложены в действующих сетях 6–35 кВ, применено простое двустороннее заземление экранов и двустороннее заземление брони (на схеме рис. 2 показана только одна из трех фаз линии). С годами, по мере роста нагрузки, изоляция кабелей будет перегреваться теплом, выделяющимся в жиле, в экране, в броне, ускоренными темпами снижая ее ресурс или даже оплавливая ее. Например, автору известно, что только за 2015 год были выявлены две явно проблемные линии с бронированными кабелями 10 и 35 кВ. Трудно оценить, сколько случаев остались неизвестными и сколько еще произойдет.

Очевидно, ситуация требует самого оперативного вмешательства с целью ограничения применения однофазных бронированных кабелей, а может быть, даже их полного запрета до тех пор, пока не будет наведен порядок в выборе схем соединения и заземления экранов и брони таких кабелей.

Первым шагом в решении накопившихся вопросов мог бы стать предложенный в настоящей статье экспресс-анализ всех 12 возможных схем соединения и заземления экранов и брони, а также формирование перечня наиболее перспективных из них.

Двустороннее заземление брони

Сравнивая тепловыделение в экране и в броне, можно показать, что в броне оно в несколько раз больше, чем в экране. Поэтому нет смысла в схемах соединения и заземления экранов и брони, где для экранов внедрены меры по борьбе с потерями и нагревом, а для брони нет и применено ее простое двустороннее заземление.

Транспозиция брони

Сечение брони однофазного кабеля 6–35 кВ достигает 500 мм². Сложно представить, что проводник такого большого сечения (а значит, и диаметра) удастся качественно вывести из транспозиционных муфт и подключить к неким коробкам транспозиции. Кроме того, транспозиция предполагает, что в муфте броня соседних строительных длин кабеля должна быть изолирована друг от друга. Следовательно, усилия продольного тяжения кабеля, возникающие, например, из-за подвижек грунта, не будут передаваться через муфту с одной строительной длины кабеля на соседнюю строительную длину. Это означает, что при подвижных грунтах бронированный кабель будет обрываться в муфте. По названным причинам и по ряду других транспозиция брони вряд ли получит распространение.

Транспозиция экранов

Во-первых, основная проблема бронированных кабелей связана с потерями в броне, т.е. о транспозиции экранов можно говорить лишь после того, как сделана транспозиция брони, а ее, к сожалению, сделать очень сложно. Во-вторых, конструкция муфты, из которой выводится экран, но не выводится броня, – наверное, не самая простая и надежная. Из сказанного следует, что транспозиция экранов бронированного кабеля затруднена.

Видно, что из трех возможных вариантов соединения и заземления экранов один (транспозиция) следует исключить, а всё внимание надо сосредоточить на двустороннем заземлении и на одностороннем заземлении.

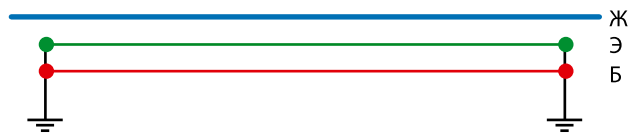
Что касается брони, то обсуждению подлежат лишь одностороннее заземление брони или же ее полное разземление.

Таким образом, в ходе рассуждений удалось снизить число разнообразных вариантов соединения и заземления с 12 схем всего до 4 (они показаны на рис. 3). Предложим методику их расчета, взяв за основу подход, использованный в [1].

Обращаем внимание, что на рис. 3 для простоты не показаны ОПН, которые устанавливаются между экранами и землей в местах разземления экранов и нужны для защиты оболочки кабеля от импульсных перенапряжений. Также тут нет и ОПН, которые, возможно, было бы полезно иметь между броней и землей.

Двустороннее заземление экранов и брони однофазного кабеля

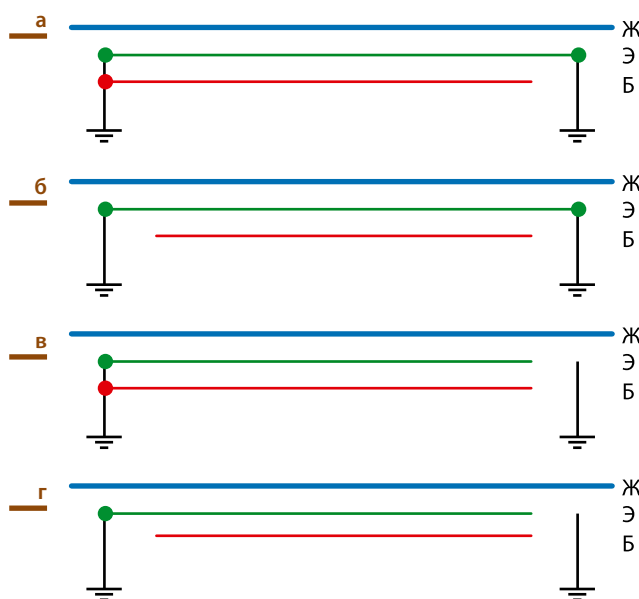
Рис. 2 •



Альтернативные схемы соединения и заземления экранов и брони:

Рис. 3 •

- двустороннее заземление экранов, одностороннее заземление брони;
- двустороннее заземление экранов, полное разземление брони;
- одностороннее заземление экранов, одностороннее заземление брони;
- одностороннее заземление экранов, полное разземление брони



БАЗОВАЯ СХЕМА

Рассмотрим расчет схемы двустороннего заземления экранов и брони (рис. 2), чтобы любой желающий мог оценить конкретные последствия от ее использования.

Для расчета токов, наведенных в экранах и броне, можно воспользоваться уже известными формулами для экрана обычного однофазного кабеля, но подставлять в них параметры эквивалента медного экрана и алюминиевой брони.

Ток эквивалента (ЭБ) экрана (Э) и брони (Б) по отношению к току жилы (Ж):

$$\frac{I_{ЭБ}}{I_{Ж}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (R_{ЭБ}^* / X_{ЭБ}^*)^2}}; \quad (1)$$

$$\frac{I_{Э}}{I_{Ж}} = \frac{R_{ЭБ}^*}{R_{Э}^*} \cdot \frac{I_{ЭБ}}{I_{Ж}}; \quad \frac{I_{Б}}{I_{Ж}} = \frac{R_{ЭБ}^*}{R_{Б}^*} \cdot \frac{I_{ЭБ}}{I_{Ж}},$$

где $R_{Э}^* = \rho_{Э} / F_{Э}$; $R_{Б}^* = \rho_{Б} / F_{Б}$ – погонные активные сопротивления экрана и брони;

$F_{Э}, F_{Б}$ – сечения экрана и брони;

$\rho_{Э} = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\rho_{Б} = 3,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельные сопротивления медного экрана и алюминиевой брони;

$$R_{ЭБ}^* = \frac{1}{1/R_{Э}^* + 1/R_{Б}^*}, \quad X_{ЭБ}^* = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2s}{d_{ЭБ}} \right) – \text{погонное}$$

активное и индуктивное сопротивление экрана и брони, включенных параллельно друг другу, где:

$$d_{ЭБ} = 0,5(d_{Э} + d_{Б}) – \text{средний диаметр экрана и брони};$$

► $d_э$ – средний диаметр экрана (он несколько больше, чем $2r_2$);
 $d_б$ – средний диаметр брони (он несколько больше, чем $2r_4$);
 $s = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{BC} \cdot d_{AC}}$ – среднегеометрическое расстояние между осями фаз кабеля;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;

$\omega = 2\pi f = 314$ рад/с – круговая частота при $f = 50$ Гц.

Относительные потери в экране и броне:

$$\frac{P_э}{P_ж} = \left(\frac{I_э}{I_ж}\right)^2 \cdot \frac{\rho_э}{\rho_ж} \cdot \frac{F_ж}{F_э}, \quad (2)$$

$$\frac{P_б}{P_ж} = \left(\frac{I_б}{I_ж}\right)^2 \cdot \frac{\rho_б}{\rho_ж} \cdot \frac{F_ж}{F_б}.$$

Коэффициент использования пропускной способности кабеля:

$$K_{И} = \frac{1}{\sqrt{1 + P_э/P_ж + P_б/P_ж}}. \quad (3)$$

Годовая стоимость потерь мощности в экранах и броне трех фаз:

$$C_{\text{год}} = \left(\frac{3P_э + 3P_б}{1000} \cdot 8760\right) \cdot C, \quad (4)$$

где C – цена потерь электроэнергии, руб./кВт·час;

8760 – число часов в году; 1000 – перевод Вт в кВт;

$P_э = (P_э/P_ж) \cdot P_ж$; $P_б = (P_б/P_ж) \cdot P_ж$ – потери мощности в экране и броне одной фазы, Вт;

$P_ж = I_ж^2 \cdot (R_ж^* \cdot L_к)$ – потери мощности в жиле одной фазы, Вт;

$I_ж$ – усредненный за год ток жилы кабеля;

$L_к$ – длина кабеля;

$R_ж^* = \rho_ж / F_ж$ – погонное активное сопротивление жилы;

$\rho_ж$ – удельное сопротивление жилы ($2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м для медной жилы; $3,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м для алюминиевой жилы);

$F_ж$ – сечение жилы.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СХЕМЫ

Схема № 1 (рис. 3а)

Наведенный ток в экране и вызванные им потери мощности можно найти по формулам (1)–(4), считая $R_б^* \rightarrow \infty$, $d_{эб} = d_э$, $I_б = 0$, $P_б = 0$.

Напряжение на разземленном конце брони относительно земли:

$$U_б = X_б^* \cdot \frac{I_ж}{\sqrt{1 + (X^*/R_э^*)^2}} \cdot L_к, \quad (5)$$

где

$X^* = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{d_э}\right)$ – погонное индуктивное сопротивление, связанное с экраном;

$X_б^* = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{d_б}\right)$ – погонное индуктивное сопротивление, связанное с броней.

Формулу (5) несложно получить, если обратить внимание, что в схеме рис. 3а наведенное на броню напряжение обусловлено совместным действием магнитных полей тока жилы и наведенного тока в экране (связь тока жилы и экрана есть в [1]).

Схема № 2 (рис. 3б)

Наведенный ток в экране и вызванные им потери мощности можно найти по формулам (1)–(4), считая $R_б^* \rightarrow \infty$, $d_{эб} = d_э$, $I_б = 0$, $P_б = 0$.

Напряжение на броне относительно земли в начале $U_{бн}$ и в конце $U_{бк}$ кабеля:

$$\begin{aligned} U_{бн} &= -0,5 \cdot U_б, \\ U_{бк} &= +0,5 \cdot U_б, \end{aligned} \quad (6)$$

где продольное наведенное на броню напряжение $U_б$ может быть найдено по (5).

Как видно, напряжение на полностью разземленной броне оказалось в два раза ниже, чем в случае ее одностороннего

заземления. Поэтому полное отсутствие заземления брони является интересным техническим решением.

Схема № 3 (рис. 3в)

Напряжение на разземленном конце экрана и брони относительно земли:

$$\begin{aligned} U_э &= X^* \cdot I_ж \cdot L_к, \\ U_б &= X_б^* \cdot I_ж \cdot L_к. \end{aligned} \quad (7)$$

Если экран и броня соединены друг с другом в месте своего разземления, то напряжение $U_э = U_б$ может быть найдено по (7), где при вычислении X^* и $X_б^*$ надо брать не диаметр экрана $d_э$ и брони $d_б$, а их средний диаметр $d_{эб} = 0,5 \cdot (d_э + d_б)$.

Схема № 4 (рис. 3г)

Напряжение на разземленном конце экрана можно найти по (7).

Напряжение на броне относительно земли в начале и в конце кабеля можно найти, обратившись к емкостной схеме замещения фазы кабеля (рис. 4). Здесь броня оказывается связана с экраном через емкость $C_э$ «экран–броня» и с землей через емкость $C_б$ «броня–земля», вычисляемые как:

$$C_э = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln(r_4/r_3)} \cdot L_к; \quad C_б = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln(r_6/r_5)} \cdot L_к,$$

где

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;

$\epsilon = 2,4$ о.е. – относительная диэлектрическая проницаемость оболочек.

Записав для рис. 4 уравнения по 1-му и 2-му законам Кирхгофа, определим:

$$\begin{aligned} U_{бн} &= 0,5 \cdot \left(U_э \cdot \frac{C_э}{C_э + C_б} - U_б \right), \\ U_{бк} &= 0,5 \cdot \left(U_э \cdot \frac{C_э}{C_э + C_б} + U_б \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где расчет напряжения на экране $U_э$ и броне $U_б$ можно выполнить по формулам (7).

Расчеты показывают, что напряжения брони в начале кабеля $U_{бн}$ и в его конце $U_{бк}$ оказываются соответственно чуть меньше и чуть больше $0,5 \cdot U_б$, т.е. являются менее опасными, чем в случае одностороннего заземления брони, когда напряжение на ее разземленном конце составляет $U_б$. Поэтому полное отсутствие заземления брони, как и ранее, является интересным техническим решением.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Кабельная линия 35 кВ длиной $L_к = 1000$ м выполнена однофазными кабелями с алюминиевой жилой $F_ж = 630$ мм², медным экраном $F_э = 50$ мм², проволочной броней (59 проволочек диаметром 3,2 мм) из сплава алюминия. Фазы проложены сомкнутым треугольником. Ток нормального режима $I_ж = 600$ А, ток трехфазного короткого замыкания 10 кА. Требуется выбрать оптимальную схему соединения и заземления экранов и брони.

Диаметр кабеля по каталогу составляет $d = 72$ мм, диаметр по экрану $d_э = 48,9$ мм, диаметр по броне $d_б = 58,8$ мм. Тогда $d_{эб} = 0,5(d_э + d_б) = 53,8$ мм.

При прокладке треугольником $d_{AB} = d_{BC} = d_{AC} = d$,

среднее расстояние между осями фаз

$$s = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{BC} \cdot d_{AC}} = d = 72 \text{ мм}.$$

Тогда

$$s / d_э = 72 / 48,9 = 1,472,$$

$$s / d_б = 72 / 58,8 = 1,224,$$

$$s / d_{эб} = 72 / 53,8 = 1,338.$$

Сечение брони $F_б = 59 \cdot \pi \cdot (3,2 / 2)^2 = 475$ мм²,

активные сопротивления элементов

$$R_э^* = 2 \cdot 10^{-8} / (50 \cdot 10^{-6}) = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м},$$

$$R_б^* = 3,2 \cdot 10^{-8} / (475 \cdot 10^{-6}) = 6,74 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м},$$

$$R_{эб}^* = 5,77 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м}.$$

Индуктивное сопротивление

$$X_{эб}^* = 2\pi \cdot 50 \cdot (4\pi \cdot 10^{-7} / 2\pi) \cdot \ln(2 \cdot 1,338) = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м}.$$

Схема рис. 2

По (1) относительные токи:

$$I_{ЭБ} / I_{Ж} = 0,732 \text{ о.е.},$$

$$I_{Э} / I_{Ж} = 0,105 \text{ о.е.},$$

$$I_{Б} / I_{Ж} = 0,627 \text{ о.е.}$$

Токи в именованных единицах:

$$I_{Э} = (I_{Э} / I_{Ж}) \cdot I_{Ж} = 0,105 \cdot 600 = 63 \text{ А},$$

$$I_{Б} = (I_{Б} / I_{Ж}) \cdot I_{Ж} = 0,627 \cdot 600 = 376 \text{ А}.$$

По (2) относительные потери:

$$P_{Э} / P_{Ж} = 0,087 \text{ о.е.},$$

$$P_{Б} / P_{Ж} = 0,521 \text{ о.е.}$$

По (3) коэффициент для бронированного кабеля

$$K_{И} = 1 / \sqrt{1 + 0,087 + 0,521} = 0,79 \text{ о.е. (79\%)}, \text{ а для кабеля без брони он был бы } K_{И} = 1 / \sqrt{1 + 0,087} = 0,96 \text{ о.е. (96\%)}.$$

По (4) потери в жиле каждой фазы $P_{Ж} = 18,3 \cdot 10^3$ Вт, потери в экране каждой фазы $P_{Э} = 0,087 \cdot (18,3 \cdot 10^3) = 1,59 \cdot 10^3$ Вт, потери в броне каждой фазы $P_{Б} = 0,521 \cdot (18,3 \cdot 10^3) = 9,53 \cdot 10^3$ Вт. Суммарная годовая стоимость потерь в экранах и броне трех фаз при цене потерь, например, $C = 1$ руб./кВт·час составит $C_{\text{год}} = 292 \cdot 10^3$ руб./год (292 тыс. руб.), из которых в экранах 42 тыс. руб., а в броне 250 тыс. руб.

Из расчетов следует, что при заземлении экранов и брони с двух сторон (рис. 2) пропускная способность кабеля может быть использована лишь на 79% от своего предельного значения. Стоимость же потерь мощности в экранах и броне ежегодно составляет около 300 тыс. рублей в расчете на каждые $L_{К} = 1000$ м трассы, причем большая часть потерь приходится на броню. Очевидно, что двустороннее заземление экранов и брони невыгодно и даже недопустимо.

В качестве альтернативы рассмотрим схемы соединения и заземления без потерь в экранах и броне – это схемы рис. 3в и рис. 3г.

Схема рис. 3в

Индуктивные сопротивления

$$X_{Э}^* = 2\pi \cdot 50 \cdot (4\pi \cdot 10^{-7} / 2\pi) \cdot \ln(2 \cdot 1,472) = 6,78 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м},$$

$$X_{Б}^* = 2\pi \cdot 50 \cdot (4\pi \cdot 10^{-7} / 2\pi) \cdot \ln(2 \cdot 1,224) = 5,62 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м}.$$

По (7) в нормальном режиме при токе $I_{Ж} = 600$ А напряжении относительно земли в месте разземления экрана и брони составит $U_{Э} = 41$ В и $U_{Б} = 34$ В.

Согласно [1, 2] рекомендуется, чтобы напряжение промышленной частоты на экране кабеля относительно земли не превышало:

- в нормальном режиме 100 В;
- при внешнем коротком замыкании 5 кВ.

Поскольку указанные цифры нормируются с учетом прочности оболочки кабеля и безопасности людей и животных, то они в полной мере могут быть отнесены и к проволочной броне – тому металлическому элементу кабеля, который расположен ближе всего к внешним покровам кабеля.

Видно, что 41 и 34 В меньше допустимых 100 В. Также можно проверить, что на время короткого замыкания с током жилы 10 кА напряжение экрана и брони не превысит 5 кВ, которые считаются предельно допустимым значением (для этого в формулу (7) вместо тока 600 А надо подставить ток 10 кА).

Схема рис. 3г

По (7) на экране относительно земли $U_{Э} = 41$ В, продольно на броне $U_{Б} = 34$ В.

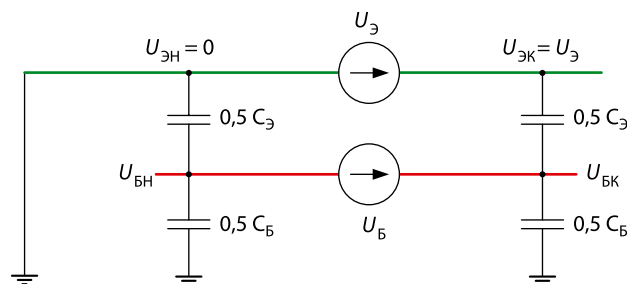
Напряжение по концам брони по (8) зависит от емкостей:

$$C_{Э} = \frac{2\pi \cdot 2,4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln(29,4 / 24,77)} \cdot 1000 = 0,78 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

$$C_{Б} = \frac{2\pi \cdot 2,4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln(36 / 31,86)} \cdot 1000 = 1,09 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Тогда в соответствии с (8) имеем в начале кабеля $U_{БН} = -8$ В (т.е. 8 В), в конце $U_{БК} = 26$ В.

Согласно расчетам наибольшее напряжение на экране относительно земли составило 41 В, а на броне относительно земли 26 В. Как видно, оба значения менее допустимого значения 100 В. Также можно проверить, что на время короткого замыкания с током жилы 10 кА напряжение экрана и брони не превысит 5 кВ, которые считаются предельно допустимым

Схема для определения напряжения на концах брони однофазного кабеля**Рис. 4 •**

значением (для этого в формулы (7) и (8) вместо тока 600 А надо подставить ток 10 кА).

Схемы рис. 3в и рис. 3г оказались оптимальными для рассмотренного кабеля. Некоторое преимущество полного отсутствия заземления брони (рис. 3г) состоит в том, что в случае повреждения внешней оболочки кабеля (и по этой причине соединения брони с землей) не будет образовываться замкнутый контур «броня–земля», опасный появлением наведенного тока промышленной частоты и разогревом брони и кабеля. Для образования такого контура в схеме рис. 3г надо иметь повреждение оболочки кабеля одновременно в двух местах, а вероятность этого низка. Если же броня имеет одностороннее заземление (рис. 3в), то, во-первых, как уже было показано, на ней больше наведенное напряжение, а во-вторых – для образования контура «броня–земля» с соответствующими последствиями по току, потерям, нагреву достаточно одного единственного повреждения оболочки.

Преимущество схемы рис. 3в, напротив, в том, что три ОПН, которые стоят в разземленных концах экрана относительно земли, можно использовать и для брони. Тогда в рамках каждой из трех фаз кабеля экран и броня не будут расцеплены (как на рис. 3в), а будут соединены друг с другом на верхнем фланце соответствующего экранного ОПН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двустороннее заземление брони однофазных бронированных кабелей чревато перегревом кабеля и его повреждением вдоль всей трассы. Двустороннее заземление экранов таких кабелей также опасно, но в меньшей степени.

Для исключения повреждения бронированных кабелей необходимо внедрять альтернативные схемы соединения и заземления их экранов и брони, в частности одностороннее заземление брони или даже ее полное разземление. Всё это снизит потери в кабеле и их стоимость, повысит длительно допустимый ток для жилы.

Проблемы с перегревом брони однофазных кабелей классов 6–35 кВ должны склонять энергетиков к минимизации случаев использования таких кабелей при строительстве электрических сетей и к необходимости поиска альтернативных способов обеспечения механической защиты линий, например за счет их прокладки в толстостенных полимерных трубах большой протяженности.

Нормы предписывают периодически проверять целостность внешней оболочки однофазных кабелей постоянным напряжением 10 кВ, прикладывая его на 1 мин. У бронированного кабеля внешняя оболочка почти в два раза тоньше, чем у обычного, и поэтому для ее проверки желательно снизить испытательное напряжение с 10 кВ до, скажем, 5 кВ. При этом надежность кабеля не пострадает, ведь от проникновения воды его защищает внутренняя оболочка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –152 с.
2. СТО 56947007-29.060.20.103-2011. Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Москва, ФСК ЕЭС.