
ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»



**СТАНДАРТ
ОРГАНИЗАЦИИ
ОАО «ФСК ЕЭС»**

**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**

Стандарт организации

Дата введения: 11.10.2011

ОАО «ФСК ЕЭС»

2011

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения стандарта организации - ГОСТ Р 1.4-2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения».

Сведения о стандарте

1 РАЗРАБОТАН: ООО «Научно-производственная фирма. Электротехника: наука и практика» (НПФ ЭЛНАП), Московский энергетический институт (МЭИ ТУ), ЗАО «Завод энергозащитных устройств» (ЗЭУ).

2 ВНЕСЕН: Департаментом технологического развития и инноваций ОАО «ФСК ЕЭС».

3 УТВЕРЖДЁН И ВВЕДЁН В ДЕЙСТВИЕ: Приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 11.10.2011 № 618.

4 ВВЕДЁН ВПЕРВЫЕ

Замечания и предложения по стандарту организации следует направлять в ОАО «ФСК ЕЭС» по адресу 117630, Москва, ул. Ак. Челомея, д. 5А, электронной почтой по адресу: vaga-na@fsk-ees.ru.

Настоящий стандарт организации не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения ОАО «ФСК ЕЭС»

Содержание

	Стр.
Введение	4
1 Область применения	4
2 Нормативные ссылки	4
3 Термины, определения и обозначения	5
4 Обоснование и выбор способа заземления экранов	7
5 Обоснование и выбор способов защиты изоляции экранов при воздействии напряжений промышленной частоты, коммутационных и атмосферных перенапряжений	12
6 Методика расчета потерь мощности в экранах	13
Приложение А. Методика расчетов токов и напряжений в экранах кабелей в установившемся режиме	15
Приложение Б. Расчеты токов, напряжений, потерь мощности в экранах	18
Приложение В. Примеры выбора способа заземления экранов	25
Приложение Г. Расчетные формулы для определения напряженности магнитного поля, созданного кабелями	27
Приложение Д. Библиография	32

Введение

В настоящем стандарте определены требования к устройствам заземления экранов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 110-500 кВ. Приведены методики расчета токов и потерь мощности в экранах кабелей, напряжений на экранах кабелей в различных режимах и различных способах заземления экранов, а также и магнитных полей, создаваемых кабелями. Рекомендованы меры по защите изоляции экранов кабелей от воздействий напряжений промышленной частоты, грозовых и коммутационных перенапряжений.

В Приложениях настоящего стандарта приведены примеры расчетов токов и напряжений в экранах, выбора ограничителей перенапряжений для защиты изоляции экранов кабелей.

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 110-500 кВ.

Положения настоящего стандарта обязательны для применения проектными, строительно-монтажными, наладочными, эксплуатационными и ремонтными организациями.

2 Нормативные ссылки

МЭК 60840. Силовые кабели с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальные напряжения свыше 30 кВ ($U_m = 36$ кВ) до 150 кВ ($U_m = 170$ кВ). Методы испытания и требования.

МЭК 62067. Силовые кабели с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 150 кВ ($U_m = 170$ кВ) до 500 кВ ($U_m = 550$ кВ). Методы испытаний и требования.

ГОСТ 15845-80 Изделия кабельные. Термины и определения.

ГОСТ 12.1.038-82 Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

ГОСТ Р 52725 – 2007. Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ.

Технические условия ТУ 16-705-495-2006. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ. Литера А. ВНИИКП, 2007. Правила устройства электроустановок. 7-я редакция.

СанПиН 2.2.4.1191 – 03. Электромагнитные поля в производственных условиях. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.

Гигиенический норматив ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях

Правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок с изменениями и дополнениями. ПОТ РМ-016-2001. РД 15334.0-03.150-00.

3 Термины, определения и обозначения

3.1 электрический кабель (кабель) (по ГОСТ 15845-80): кабельное изделие, содержащее одну или более изолированных жил (проводников), заключенных в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой, в зависимости от условий прокладки и эксплуатации, может иметься соответствующий защитный покров, в который может входить броня, и пригодное, в частности, для прокладки в земле и под водой.

3.2 силовой кабель: кабель для передачи электрической энергии токами промышленных частот.

3.3 токопроводящая жила: элемент кабельного изделия, предназначенный для прохождения электрического тока.

3.4 изолированная жила: токопроводящая жила, покрытая изоляцией.

3.5 изоляция из сшитого полиэтилена: сплошная изоляция из сшитого полиэтилена.

3.6 кабельный экран (экран): элемент из электропроводящего немагнитного и (или) магнитного материала либо в виде цилиндрического слоя вокруг токопроводящей или изолированной жилы, группы, пучка, всего сердечника или его части, либо в виде разделительного слоя различной конфигурации.

3.7 кабельная оболочка (изоляция экрана): кабельная оболочка в виде слоя полиэтилена, наносимого на экран кабеля.

3.8 заземление экранов кабеля: способ соединения экранов кабеля, при котором они электрически связаны с контуром заземления.

3.9 транспозиция экранов кабеля: способ соединения экранов трехфазной кабельной линии, при котором при переходе с одного участка на другой фазы меняются местами так, чтобы каждая из них попеременно занимает положение остальных.

3.10 коробка транспозиции: устройство, в котором осуществляется соединение экранов кабелей, называемое транспозицией.

3.11 коробка концевая: устройство, предназначенное для соединения экранов кабелей с контуром заземления (напрямую или через ОПН).

3.12 рабочий (расчетный) ток кабеля: Ток, принятый для данного кабеля в процессе проектирования электроустановки.

3.13 длительно допустимый ток кабеля: ток, определяемый исходя их длительно допустимой температуры изоляции.

3.14 ток термической стойкости кабеля (экрана): ток, определяемый исходя из температуры изоляции, допустимой на время короткого замыкания.

3.15 ток в жиле: $t_{ж}$ ток в жиле кабеля в симметричном режиме.

3.16 ток в экране: $t_{э}$ ток в экране кабеля в симметричном режиме.

3.15 ОПН: ограничитель напряжений нелинейный (ГОСТ Р 52725 – 2007), предназначенный для защиты изоляции электрооборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений.

3.16 КЛ: кабельная линия.

3.17 **КСПЭ**: кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, имеющий медную или алюминиевую жилу, экран и, возможно, свинцовую оболочку.

3.18 **КЗ**: короткое замыкание за пределами КЛ.

3.19 **КЗ несимметричное**: однофазное КЗ за пределами КЛ.

3.20 **МП**: магнитное поле кабеля.

Обозначения параметров, необходимых для расчета

3.21 r_1 : внешний радиус жилы (м).

3.22 r_2 : внутренний радиус экрана (м).

3.23 r_3 : внешний радиус экрана (м).

3.24 r_4 : внешний радиус кабеля (м).

3.25 $d_э$: средний диаметр экрана (м).

3.26 d : внешний диаметр фазы кабеля (м).

3.27 $l_к$: длина кабеля (м).

3.28 s : среднее расстояние между осями соседних фаз (м).

3.29 $F_ж$: сечение жилы (м²).

3.30 $F_э$: сечение экрана (м²).

3.31 $\rho_ж$: удельное сопротивление материала жилы (Ом*м).

3.32 $\rho_э$: удельное сопротивление материала экрана (Ом*м).

3.33 $\rho_з$: удельное сопротивление грунта (Ом*м).

3.34 $R_ж^*$: погонное активное сопротивление жилы (Ом/м).

3.35 $R_э^*$: погонное активное сопротивление экрана (Ом/м).

3.36 $D_з$: эквивалентная расчетная глубина протекания обратного тока (м).

3.37 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$: магнитная постоянная (Гн/м).

3.38 $\omega = 2\pi f$: угловая частота напряжений и токов (рад/с).

3.39 **К**: число секций экрана, каждая из которых заземлена один раз.

3.40 **N**: число полных циклов транспозиции.

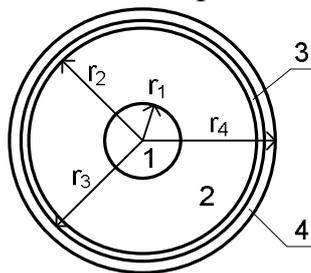


Рис. 1 Эскиз сечения кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена.

1 - токоведущая жила, 2 – изоляция, 3 – экран кабеля, 4 – оболочка экрана

4 Обоснование и выбор способа заземления экранов

4.1 Способы заземления экранов

4.1.1. Заземление экрана КСПЭ необходимо с целью сохранения структуры электрического поля в его изоляции в условиях эксплуатации. Экран кабеля (каждой фазы КЛ) должен быть заземлен, по крайней мере, в одной точке. Эксплуатация кабеля с незаземленным экраном не допускается.

Заземление экранов может быть выполнено:

- с одного конца (одностороннее заземление);
- с двух концов (двустороннее заземление);
- с двух концов с использованием полного цикла транспозиции.

Схемы заземления экранов приведены на рис.1-3.

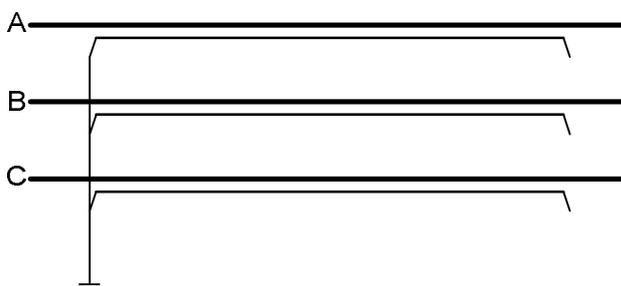


Рис.1 Схема заземления экранов с одного конца.

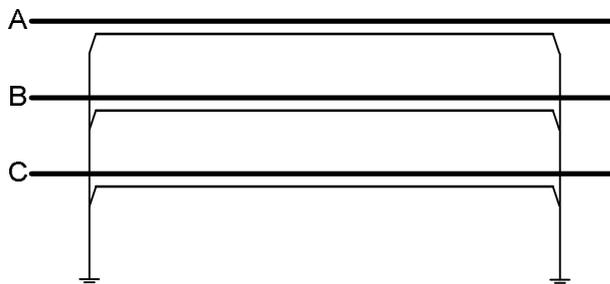


Рис.2 Схема заземления экранов с двух концов

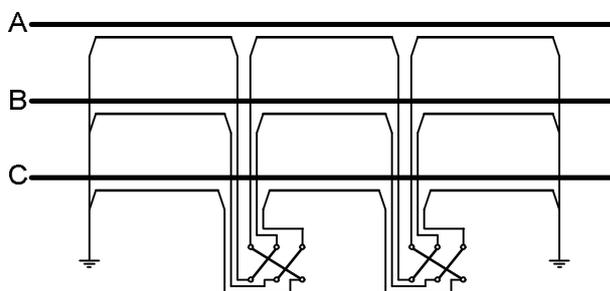


Рис.3 Схема заземления экранов с полным циклом транспозиции

Методика расчета токов и напряжений в экранах приведена в Приложении А, обобщающие зависимости – в Приложении Б, примеры выбора способа заземления экранов – в Приложении В.

4.1.2. Допускается применение разных способов заземления экранов по трассе КЛ, включая многократное повторение одного и того же способа заземления (рис.4 и 5). Рекомендуется производить деление на секции в местах установки кабельных муфт.

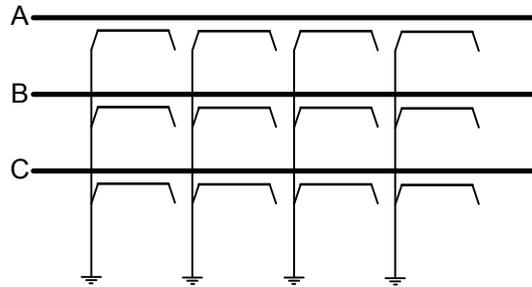


Рис.4 Разделение экранов на $K = 4$ отдельных секций, каждая из которых заземлена только один раз

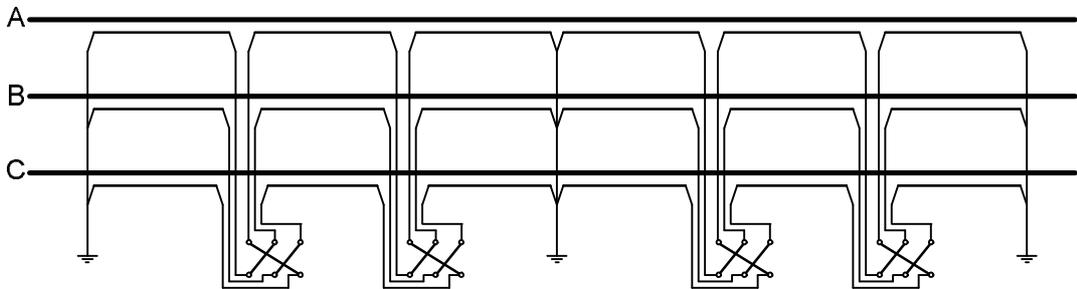


Рис.5 Заземление экранов с двойным ($N = 2$) полным циклом транспозиции и заземлением средней точки

4.1.3. Кабельные муфты и вводы должны быть заземлены в соответствии с инструкцией поставщика оборудования.

4.1.4. Заземление экранов двух или более кабелей в каждой фазе должно быть выполнено одним и тем же способом для каждого кабеля фазы.

4.1.5. Сечение экрана кабеля и заземляющих проводников должно соответствовать уровню токов КЗ и длительности их протекания. Плотность тока в экране не должна превышать $j_{Э1} \leq 0.15 \div 0.17 \text{ кА/мм}^2$ в течении 1 с.

Для времени существования тока короткого замыкания $t_{кз}$ от 0,2 до 5 с пересчет допустимой плотности тока следует производить по формуле

$$j(t_{кз}) = j_{Э1} / \sqrt{t_{кз}} \quad (1)$$

4.2 Выбор способа заземления экранов

4.2.1 Одностороннее заземление экрана

4.2.1.1 Заземление экрана кабеля с одной стороны, как правило, используется для кабелей длиной не более 1 км.

При длине кабеля более 1 км допускается использовать многократное заземление экрана с одного конца (см. рис. 4).

4.2.1.2 В случае заземление экрана с одной стороны на экране кабеля наводится напряжение промышленной частоты относительно земли в нормальном режиме работы сети и при КЗ.

Примечание. Рассматривается однофазное КЗ вне кабеля. Режим КЗ в кабеле рассматривается в СТО по выбору сечения жил и экранов кабелей.

Наибольшее напряжение на экране кабеля относительно земли возникает непосредственно на незаземленном или заземленном через ОПН конце экрана.

Все работы, связанные с прикосновением к оболочкам и экранам кабелей, должны выполняться на отключенном кабеле.

4.2.1.3 В симметричном режиме (при протекании рабочего тока или тока трехфазного КЗ) наибольшее напряжение на экране кабеля относительно земли определяют по формуле:

$$U_{\text{э}} = \frac{X^* \cdot I_{\text{ж}} \cdot l_{\text{к}}}{K}, \quad (2)$$

где $X^* = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{d_{\text{э}}}\right)$ – индуктивное сопротивление петля экран – жила.

При расчете индуктивного сопротивления X^* при прокладке кабелей треугольником следует принимать $s = d$, а при прокладке «в плоскости» следует принимать s равным расстоянию между осями соседних фаз, помноженному на 1,26. Если расстояние между фазами различается на отдельных участках трассы КЛ, то следует принимать среднее значение s по трассе.

Диаметр экрана, при отсутствии точных данных о его размерах и толщине оболочки кабеля, следует определять $d_{\text{э}} = d - 2 \cdot (6 \cdot 10^{-3})$, по известному диаметру кабеля и типовой толщине оболочки, составляющей около 6 мм.

4.2.1.4 В несимметричном режиме (при протекании тока однофазного КЗ) наибольшее напряжение на экране кабеля относительно земли определяют по формуле:

$$U_{\text{э}} = \frac{X_{\text{жэ}}^* \cdot I_{\text{ж}} \cdot l_{\text{к}}}{K}, \quad (3)$$

где $X_{\text{жэ}}^* = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2D_3}{d_{\text{э}}}\right)$ – индуктивное сопротивление, при расчете которого предварительно находят $D_3 = 2.24 \sqrt{\rho_3 / (\omega \cdot \mu_0)}$. При прокладке кабелей в коллекторе или лотках на территории подстанции или переходного пункта следует принимать $D_3 = 1$ м.

При отсутствии данных о распределении токов КЗ по элементам схемы следует принимать ток в жиле $I_{\text{ж}}$ равным току однофазного короткого замыкания сети.

4.2.1.5 Для широкого диапазона значений параметров КСПЭ по приближенной оценке напряжение на экране не превысит:

– в симметричном режиме $U_{\text{э}} \leq 200 \text{ В}/(\text{кА} \cdot \text{км})$;

- при однофазном коротком замыкании $U_{\text{э}} \leq 700 \text{ В}/(\text{кА} \cdot \text{км})$ при прокладке в грунте и $U_{\text{э}} \leq 300 \text{ В}/(\text{кА} \cdot \text{км})$ при прокладке на территории подстанции.

4.2.1.6 По требованиям электробезопасности напряжение на разомкнутом конце экрана относительно земли во всех режимах не должно превышать 25 В. Если это требование не выполняется, то должны быть приняты меры (например, установлены специальные концевые коробки), ограничивающие доступ к экрану кабеля, а все работы, связанные с прикосновением к оболочкам кабелей, должны выполняться только на отключенном кабеле.

4.2.1.7 Действующее значение напряжения на разомкнутом конце экрана относительно земли при КЗ не должно превышать 5 кВ. Если это требование не выполняется, то необходимо или отказаться от одностороннего заземления экранов, или увеличить число секций K .

4.2.1.8. Для защиты изоляции экранов от грозовых и коммутационных перенапряжений в местах разземления экранов устанавливаются ОПН (см раздел 5), размещаемые или «открытым способом», или в концевых коробках.

4.2.1.9. Согласно СанПиН 2.2.4.1191 – 03, ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07 и ПОТ РМ-016-2001 напряженность магнитного поля, созданного КЛ должна быть ограничена. Расчет МП, созданного кабелем с односторонним заземлением экрана должен проводиться по наибольшему значению рабочего тока в жиле (см. Приложение Г).

4.2.2 Заземление экрана кабеля с двух сторон

4.2.2.1 При заземлении экрана кабеля с двух сторон по нему протекает ток, соизмеримый с током жилы кабеля.

4.2.2.2 Отношение тока в экране ($I_{\text{э}}$) к току в жиле ($I_{\text{ж}}$) в нормальном симметричном рабочем режиме определяется по формуле

$$\frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{ж}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_{\text{э}}^*}{X^*}\right)^2}}. \quad (3)$$

4.2.2.3 Протекание тока по экрану в рабочем режиме вызывает дополнительные потери мощности и нагрев кабеля.

Отношение потерь в экране ($P_{\text{э}}$) к потерям в жиле ($P_{\text{ж}}$) в рабочем режиме определяется по формуле

$$\frac{P_{\text{э}}}{P_{\text{ж}}} = \frac{R_{\text{э}} / R_{\text{ж}}}{\left[1 + \left(\frac{R_{\text{э}}^*}{X^*}\right)^2\right]} \quad (4)$$

Суммарные (результатирующие) потери в кабеле равняются сумме потерь в жиле и в экране.

4.2.2.4 Допустимый ток в жиле, рассчитываемый по тепловому режиму, должен быть уменьшен, если экран заземлен с двух сторон.

4.2.2.5 Коэффициент уменьшения допустимого тока в экране при наличии его двустороннего заземления зависит от сечения экрана и жилы, способа прокладки кабеля (в треугольник, «в плоскости»).

Связь длительно допустимого тока в жиле кабеля при наличии потерь (I_{доп}) в экране и при их отсутствии (идеальный случай) (I_{доп.ид}) может быть оценена как

$$\frac{I_{доп}}{I_{доп,ид}} = K_{и}, \quad (5)$$

где $K_{и} = 1/\sqrt{1 + P_{э}/P_{ж}}$ – коэффициент, характеризующий степень использования пропускной способности однофазного кабеля.

4.2.2.6 Решение о применении заземления экранов с двух сторон должно быть обосновано технико-экономическим расчетом, учитывающим коэффициент использования пропускной способности кабеля.

4.2.2.7 При использовании двустороннего заземления экрана МП должно рассчитываться с учетом токов в экранах при наибольших значениях тока в жилах кабелей в длительном режиме.

4.2.3 Заземление экранов кабелей с их транспозицией

4.2.3.1 Заземление экранов кабелей с обоих концов с применением транспозиции используется, как правило, в протяженных (более 1 км) кабельных линиях.

4.2.3.2 При разбиении экрана на одинаковые участки в симметричном режиме работе (при сдвиге токов в фазах точно на 120 градусов) токи в экранах практически отсутствуют (определяются только емкостью между жилой и экраном).

В режиме однофазного КЗ ток в экране может достигать примерно 0,65 от тока в жиле поврежденной фазы.

4.2.3.3 При использовании транспозиции наибольшее напряжение на изоляции экранов достигается в узлах транспозиции и определяется:

- в симметричном режиме (при протекании рабочего тока или тока трехфазного КЗ) по формуле

$$U_{э} = \frac{X^* \cdot I_{ж} \cdot l_{к}}{3N}, \quad (6)$$

- в несимметричном режиме (при протекании тока однофазного КЗ) по формуле

$$U_{э} = \frac{2 \cdot X^* \cdot I_{ж} \cdot l_{к}}{9N}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) показывают, что применение транспозиции как минимум втрое уменьшает напряжение на изоляции экранов по сравнению со случаем одностороннего заземления $K = 1$.

Случай, когда при транспозиции экран делится на участки разной длины, рассматривается в разделе 6.

4.2.3.4 Действующее значение напряжения в узле транспозиции относительно земли при КЗ не должно превышать 5 кВ. Если это требование не выполняется, то необходимо увеличить число циклов N (рис.5, $N = 2$).

4.2.3.5 Для защиты изоляции экранов от грозовых и коммутационных перенапряжений в узлах транспозиции устанавливают ОПН (см. раздел 5), размещаемые в коробках транспозиции.

4.2.3.6 Расчет МП, создаваемого КЛ, следует проводить для наибольших значений тока в жилах в длительном режиме (см. Приложение Г).

4.3. Требования к заземлению экранов кабелей, концевых и транспозиционных коробок.

Заземление экранов кабелей, концевых и транспозиционных коробок должны быть выполнены в соответствии с требованиями ПУЭ гл.1.7 по условиям электробезопасности.

Заземляющие проводники от экранов и концевых коробок следует присоединять к заземляющему устройству подстанции или переходного пункта. В местах заземления экранов и концевых коробок должны быть выполнены требования к заземляющему устройству п. 1.7.91. ПУЭ 7-е изд..

В местах расположения (кабельные колодцы) транспозиционных коробок и промежуточных муфт должна быть выполнена система выравнивания и уравнивания потенциалов (заземляющее устройство), обеспечивающая выполнение требований п.1.7.91 ПУЭ.

Сечение экрана кабеля и заземляющих проводников должно соответствовать уровню токов КЗ и длительности их протекания. Расчет сечения заземляющих проводников должен проводиться для температуры, допустимой для экранов кабелей, указанной производителем кабелей. Плотность тока в экране не должна превышать значений, указанных в п. 4.1.4.

5 Обоснование и выбор защиты изоляции экранов при воздействии напряжений промышленной частоты, коммутационных и атмосферных перенапряжений

5.1 Ограничение напряжений промышленной частоты должно осуществляться путем выбора способа заземления экранов (см. раздел 4). Схема заземления экранов должна быть такой, чтобы действующее значение напряжения промышленной частоты на изоляции экрана не превосходило 5 кВ.

Повышение допустимого напряжения более 5 кВ возможно только по согласованию с производителем кабеля и муфт (концевых и соединительных).

5.2 Защита изоляции экранов кабелей от коммутационных и грозовых перенапряжений должна осуществляться с помощью ОПН, которые следует устанавливать на незаземленном конце экрана при одностороннем его заземлении или в транспозиционных коробках при использовании транспозиции.

5.3 Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН должно удовлетворять условию

$$U_{HPO} \geq \frac{U_{\text{э}}}{K_H(t_{KЗ})}, \quad (8)$$

где $U_{\text{э}}$ – наибольшее напряжение промышленной частоты на экране относительно земли при КЗ, $K_H(t_{KЗ})$ – допустимая кратность повышения напряжения на ОПН, являющаяся одной из точек типовой характеристики «напряжение-время» ОПН (таблица 1), соответствующей времени $t_{KЗ}$ работы резервной защиты, отключающей КЗ.

Таблица 1 – Зависимость допустимой кратности повышения напряжения промышленной частоты на ОПН сверх U_{HPO} от времени воздействия

Длительность t приложения повышенного напряжения промышленной частоты	Допустимая кратность $K_H(t)$ превышения напряжения на ОПН, не менее, о.е.
0,1 с	1,40
1 с	1,35
10 с	1,30
100 с	1,23
1200 с	1,15
3600 с	1,10

Примечание. Значения $K_H(t)$ выражены в долях U_{HPO} . Уточненные значения $K_H(t)$ следует брать из каталогов производителей кабелей.

5.4 Удельную энергию ОПН, включаемых в цепи заземления экранов кабелей 500 кВ, рекомендуется принимать 4,5 кДж/кВ, а для кабелей 110-330 – 2-3 кДж/кВ.

Выбранный тип ОПН должен быть согласован с поставщиком кабеля.

6 Методика расчета потерь мощности в экранах

6.1 Наибольшие потери мощности в экранах возникают при заземлении экранов с двух сторон. Для некоторого снижения потерь в экранах при их заземлении с двух сторон возможно:

- использование прокладки кабеля «треугольником»;
- применение кабелей с малым сечением экрана (в том числе за счет ограничения токов короткого замыкания).

Расчет потерь мощности при заземлении экранов с двух сторон производится по формуле (4) на основе известных потерь в жиле $P_{Ж}$.

6.2 Для исключения потерь в экранах ($P_{\text{э}} = 0$) следует применять

- заземление экрана с одного конца;
- заземление экранов с двух сторон с применением транспозиции, когда экраны кабеля разделяются коробками транспозиции на равные участки, количество которых кратно трем.

6.3 Существенное снижение потерь достигается даже в случае применения «неидеальной транспозиции», когда экраны кабеля разделяются коробками транспозиции на участки разной длины и/или число участков не кратно трем. Расчетные выражения для токов и потерь:

$$\frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{ж}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_{\text{э}}}{X}\right)^2}} \cdot K_T \quad (10)$$

$$\frac{P_{\text{э}}}{P_{\text{ж}}} = \frac{R_{\text{э}} / R_{\text{ж}}}{\left[1 + \left(\frac{R_{\text{э}}}{X}\right)^2\right]} \cdot K_T^2 \quad (11)$$

где K_T – коэффициент транспозиции, вычисляемый как

$$K_T = \frac{\sqrt{[l_1 - 0.5(l_2 + l_3)]^2 + [0.5\sqrt{3}(l_2 - l_3)]^2}}{l_K},$$

где l_1 – суммарная длина всех участков кабеля, на которых выбранный экран принадлежит одной из трех жил, l_2 – второй из трех жил, l_3 – третьей.

В случае идеальной транспозиции ($l_1 = l_2 = l_3 = l_K/3$) $K_T = 0$, при отсутствии транспозиции ($l_1 = l_K, l_2 = l_3 = 0$) $K_T = 1$.

Возможно применение такой транспозиции, при которой экраны разделяются только на два участка равной длины. При этом, по сравнению со случаем заземления экранов с двух сторон, токи в экранах снижаются в 2 раза, а потери – в 4 раза.

6.4. Выбор способа заземления экранов и применение транспозиции для исключения или снижения потерь мощности осуществляется на основании технико-экономических расчетов.

Приложение А

Методика расчетов токов и напряжений в экранах кабелей в установившемся режиме

А.1 Выбор схемы заземления экранов КСПЭ производится на основании результатов расчета напряжений на экранах и токов в них. Ниже приводятся расчетные формулы, позволяющие провести все необходимые расчеты в установившихся режимах для следующих вариантах заземления экранов:

- при заземлении экрана с одного конца (одностороннее заземление);
- при заземлении экрана с двух сторон;
- при заземлении экрана с двух сторон при наличии транспозиции.

А.2 Обозначения используемых величин.

$\dot{I}_ж$ и $\dot{I}_э$ – продольные токи в жиле и экране однофазного кабеля,

$Z_ж$ – собственное продольное погонное сопротивление жилы кабеля Ом/м,

$Z_э$ – собственное продольное погонное сопротивление экрана кабеля Ом/м,

$Z_{жэ}$ – взаимное продольное погонное сопротивление между жилой и экраном кабеля Ом/м.

Для вычисления погонных сопротивлений используются формулы:

$$Z_ж = R_з + R_ж + j\omega L_ж, \quad (\text{A.1})$$

$$Z_э = R_з + R_э + j\omega L_э, \quad (\text{A.2})$$

$$Z_{жэ} = R_з + j\omega M_{жэ}, \quad (\text{A.3})$$

$$Z_к = R_з + j\omega M_к, \quad (\text{A.4})$$

куда входят следующие погонные индуктивности

$L_ж$ – собственная индуктивность жилы ($\Gamma\text{н}/\text{м}$) кабеля,

$L_э$ – собственная индуктивность экрана ($\Gamma\text{н}/\text{м}$) кабеля,

$M_{жэ}$ – взаимная индуктивность ($\Gamma\text{н}/\text{м}$) между жилой и экраном кабеля,

$j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Погонное сопротивление земли (Ом/м) определяется согласно выражению

$$R_з = (\pi/4) \cdot \mu_0 f. \quad (\text{A.5})$$

Погонные собственные и взаимные индуктивности определяют как

$$L_ж = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_з}{r_1} \right), \quad (\text{A.6})$$

$$L_э = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2D_з}{d_э} \right), \quad (\text{A.7})$$

$$M_{жэ} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2D_з}{d_э} \right), \quad (\text{A.8})$$

где $M_{жэ}$ – взаимная индуктивность между фазами, $D_з$ – расчетная глубина залегания фиктивного обратного провода, определяемая по выражению

$$D_з = 2.24 \sqrt{\rho_з / (\omega \cdot \mu_0)}, \quad (\text{A.9})$$

$$M_к = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_з}{s}. \quad (\text{A.10})$$

Расстояние между осями жил трехфазного кабеля s равно внешнему диаметру кабеля при прокладке «треугольником» или среднеквадратическому значению расстояний между ося-

ми фаз кабеля при прокладке «в плоскости» ($s = \sqrt[3]{d_{12}d_{23}d_{31}}$, где d_{ij} – расстояние между осями фаз).

При прокладке кабелей в коллекторе, на территории предприятия или распределительного устройства считают $D_3 = 1$ м.

А.3 Расчетные формулы

Формулы для расчета напряжений и токов в экранах сведены в табл. А.1 и А.2

Таблица А.1. Индуцированные токи в экранах кабеля

Состояние экранов	Нормальный режим или трехфазное короткое замыкание вне кабеля	Однофазное короткое замыкание вне кабеля (например, в фазе «А»)
Заземлены с двух сторон	$\dot{I}_{\text{ЭА}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^*}{\dot{Z}_{\text{Э}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^*} \dot{I}_{\text{ЖА}}$ $\dot{I}_{\text{ЭВ}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^*}{\dot{Z}_{\text{Э}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^*} \dot{I}_{\text{ЖВ}}$ $\dot{I}_{\text{ЭС}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^*}{\dot{Z}_{\text{Э}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^*} \dot{I}_{\text{ЖС}}$	$\dot{I}_{\text{ЭА}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^* \frac{\dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*}{\dot{Z}_{\text{Э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*}}{\dot{Z}_{\text{Э}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^*} \dot{I}_{\text{ЖА}}$ $\dot{I}_{\text{ЭВ}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{К}}^* (\dot{Z}_{\text{Э}}^* - \dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^*)}{(\dot{Z}_{\text{Э}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^*) (\dot{Z}_{\text{Э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*)} \dot{I}_{\text{ЖА}}$ $\dot{I}_{\text{ЭС}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{К}}^* (\dot{Z}_{\text{Э}}^* - \dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^*)}{(\dot{Z}_{\text{Э}}^* - \dot{Z}_{\text{К}}^*) (\dot{Z}_{\text{Э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*)} \dot{I}_{\text{ЖА}}$
Заземлены с одной стороны	$\dot{I}_{\text{ЭА}} \approx 0$ $\dot{I}_{\text{ЭВ}} \approx 0$ $\dot{I}_{\text{ЭС}} \approx 0$	$\dot{I}_{\text{ЭА}} \approx 0$ $\dot{I}_{\text{ЭВ}} \approx 0$ $\dot{I}_{\text{ЭС}} \approx 0$
Заземлены с двух сторон и транспонированы	$\dot{I}_{\text{ЭА}} \approx 0$ $\dot{I}_{\text{ЭВ}} \approx 0$ $\dot{I}_{\text{ЭС}} \approx 0$	$\dot{I}_{\text{ЭА}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*}{\dot{Z}_{\text{Э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*} \cdot \frac{\dot{I}_{\text{ЖА}}}{3}$ $\dot{I}_{\text{ЭВ}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*}{\dot{Z}_{\text{Э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*} \cdot \frac{\dot{I}_{\text{ЖА}}}{3}$ $\dot{I}_{\text{ЭС}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{ЖЭ}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*}{\dot{Z}_{\text{Э}}^* + 2\dot{Z}_{\text{К}}^*} \cdot \frac{\dot{I}_{\text{ЖА}}}{3}$

Таблица А.2. Индуктированные напряжения в экранах кабеля

Состояние экранов	Нормальный режим или трехфазное короткое замыкание вне кабеля	Однофазное короткое замыкание вне кабеля (например, в фазе «А»)
Заземлены с двух сторон	$\dot{U}_{ЭА} \approx 0$ $\dot{U}_{ЭВ} \approx 0$ $\dot{U}_{ЭС} \approx 0$	$\dot{U}_{ЭА} \approx 0$ $\dot{U}_{ЭВ} \approx 0$ $\dot{U}_{ЭС} \approx 0$
Заземлены с одной стороны	$\dot{U}_{ЭА} = (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot \dot{I}_{ЖА} \cdot L_K$ $\dot{U}_{ЭВ} = (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot \dot{I}_{ЖВ} \cdot L_K$ $\dot{U}_{ЭС} = (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot \dot{I}_{ЖС} \cdot L_K$	$\dot{U}_{ЭА} = \dot{Z}_{ЖЭ}^* \cdot \dot{I}_{ЖА} \cdot L_K$ $\dot{U}_{ЭВ} \approx 0$ $\dot{U}_{ЭС} \approx 0$
Заземлены с двух сторон и транспонированы	$\dot{U}_{ЭА} = (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot \dot{I}_{ЖА} \cdot L_K / 3N$ $\dot{U}_{ЭВ} = (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot \dot{I}_{ЖВ} \cdot L_K / 3N$ $\dot{U}_{ЭС} = (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot \dot{I}_{ЖС} \cdot L_K / 3N$	$\dot{U}_{ЭА} = (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot \dot{I}_{ЖА} \cdot 2L_K / 9N$ $\dot{U}_{ЭВ} = (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot \dot{I}_{ЖВ} \cdot 2L_K / 9N$ $\dot{U}_{ЭС} = (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot \dot{I}_{ЖС} \cdot 2L_K / 9N$

Примечание. В табл. А.2 символ N означает число циклов транспозиции.

Вывод формул, содержащихся в табл. А.1 и .2, приведен в [2,3] Приложения Д.

Приложение Б

Расчеты токов, напряжений, потерь мощности в экранах

Во многих случаях достаточно проводить расчеты для одной трехфазной группы однофазных кабелей без учета соседних трехфазных групп. Такие расчеты удобно выполнять или с помощью приведенных ниже обобщающих зависимостей, или с использованием компьютерной программы «ЭКРАН».

Б.1. Экраны кабеля заземлены с двух сторон

Расчету подлежат токи в экранах, потери в экранах. Для расчетов используют или выражения (3), (4), или зависимости рис.Б.1 и рис.Б.2.

Коэффициент использования пропускной способности вычисляют по (5).

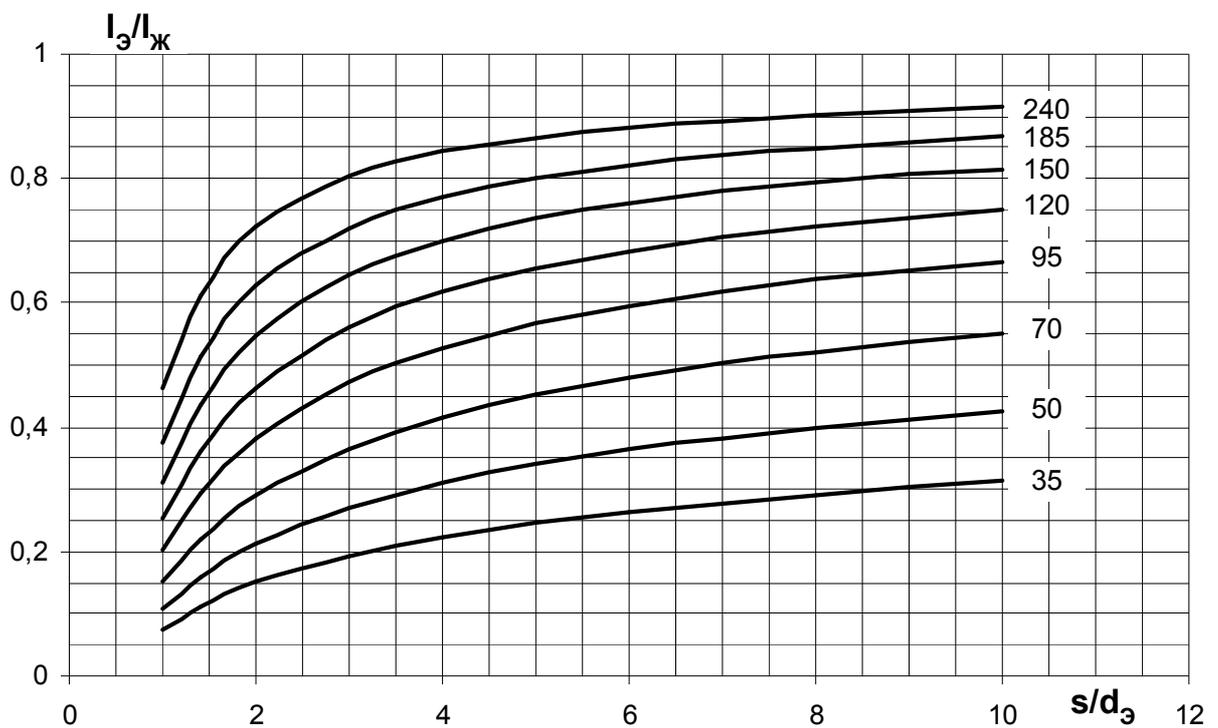
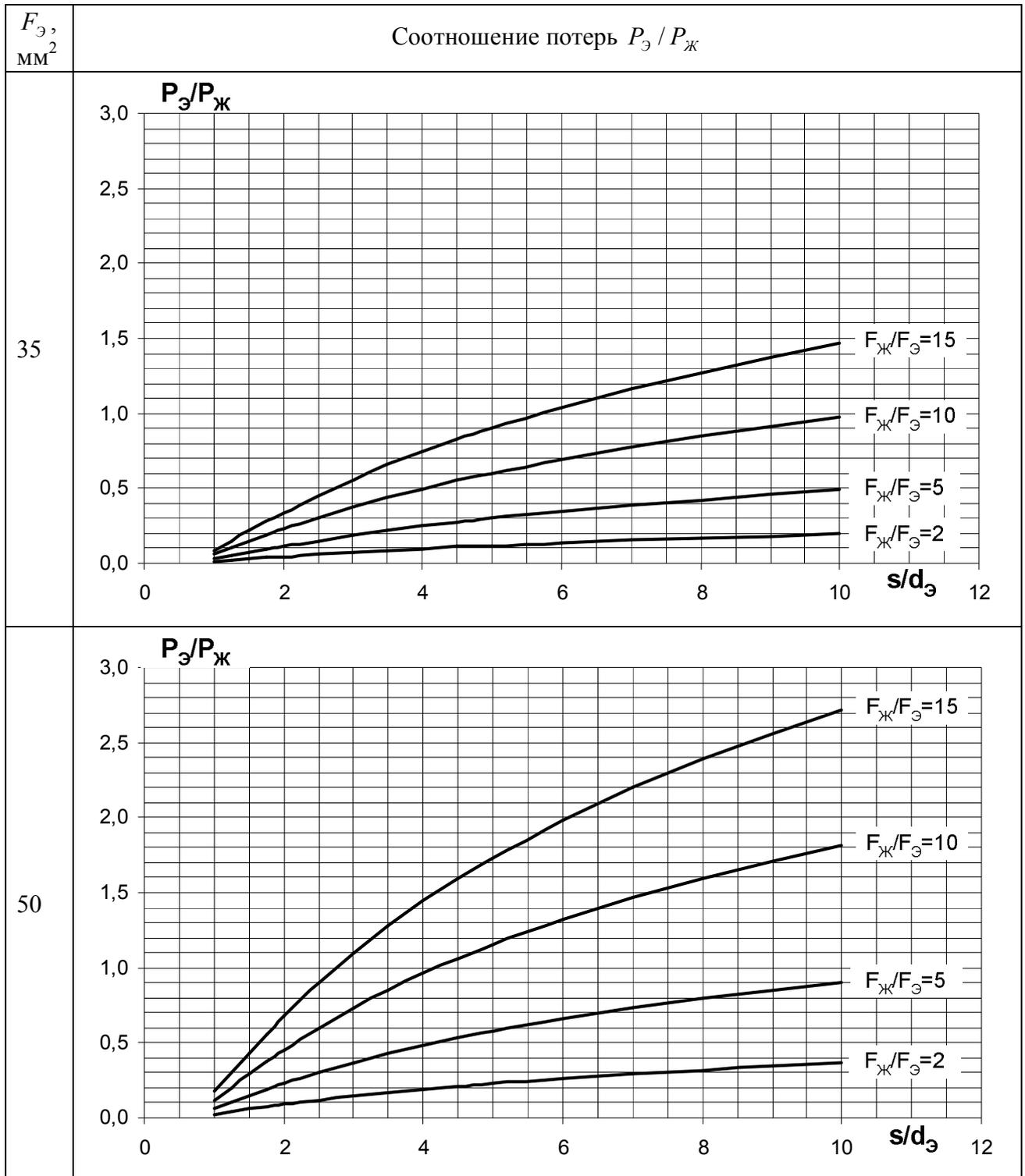
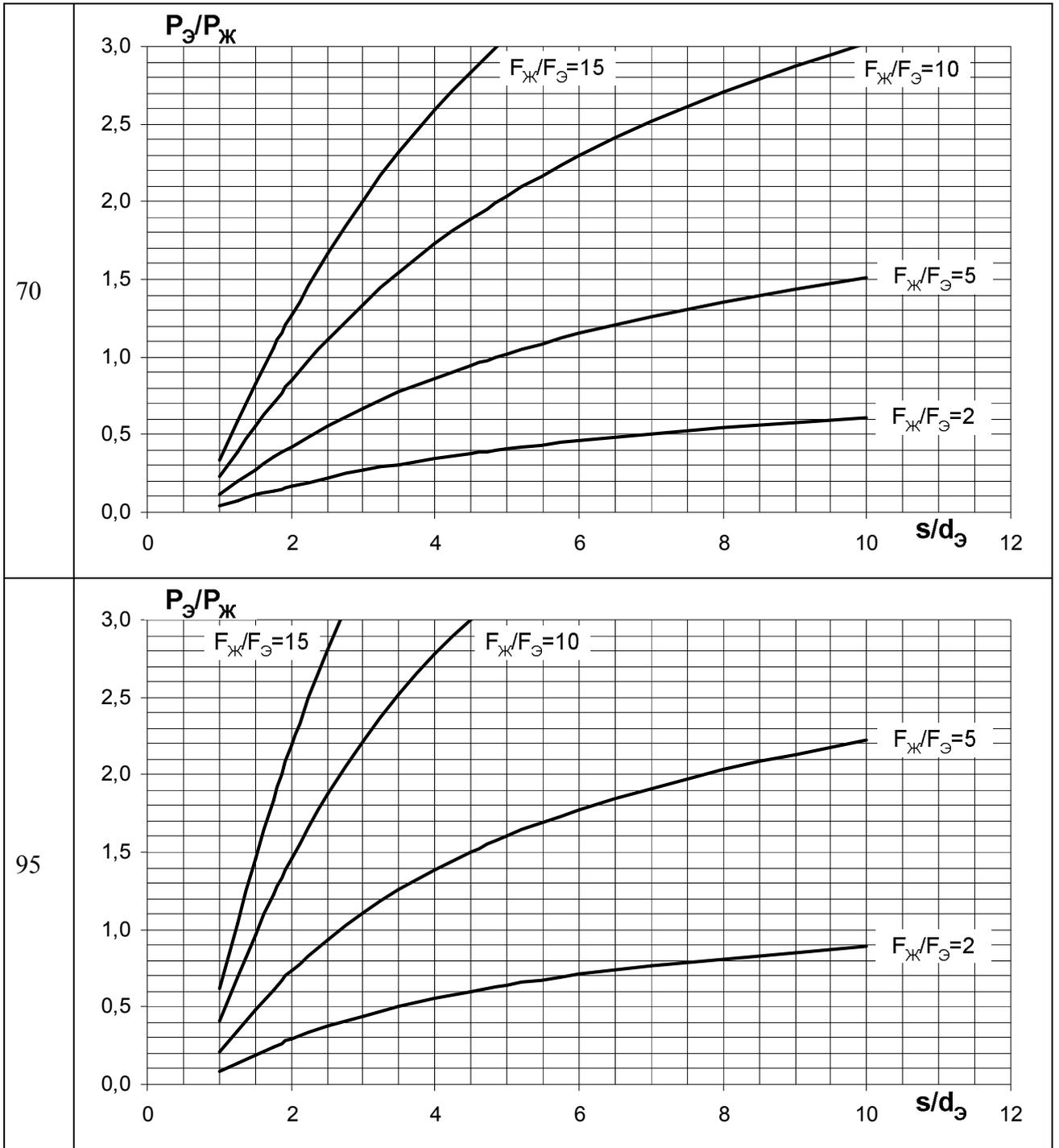
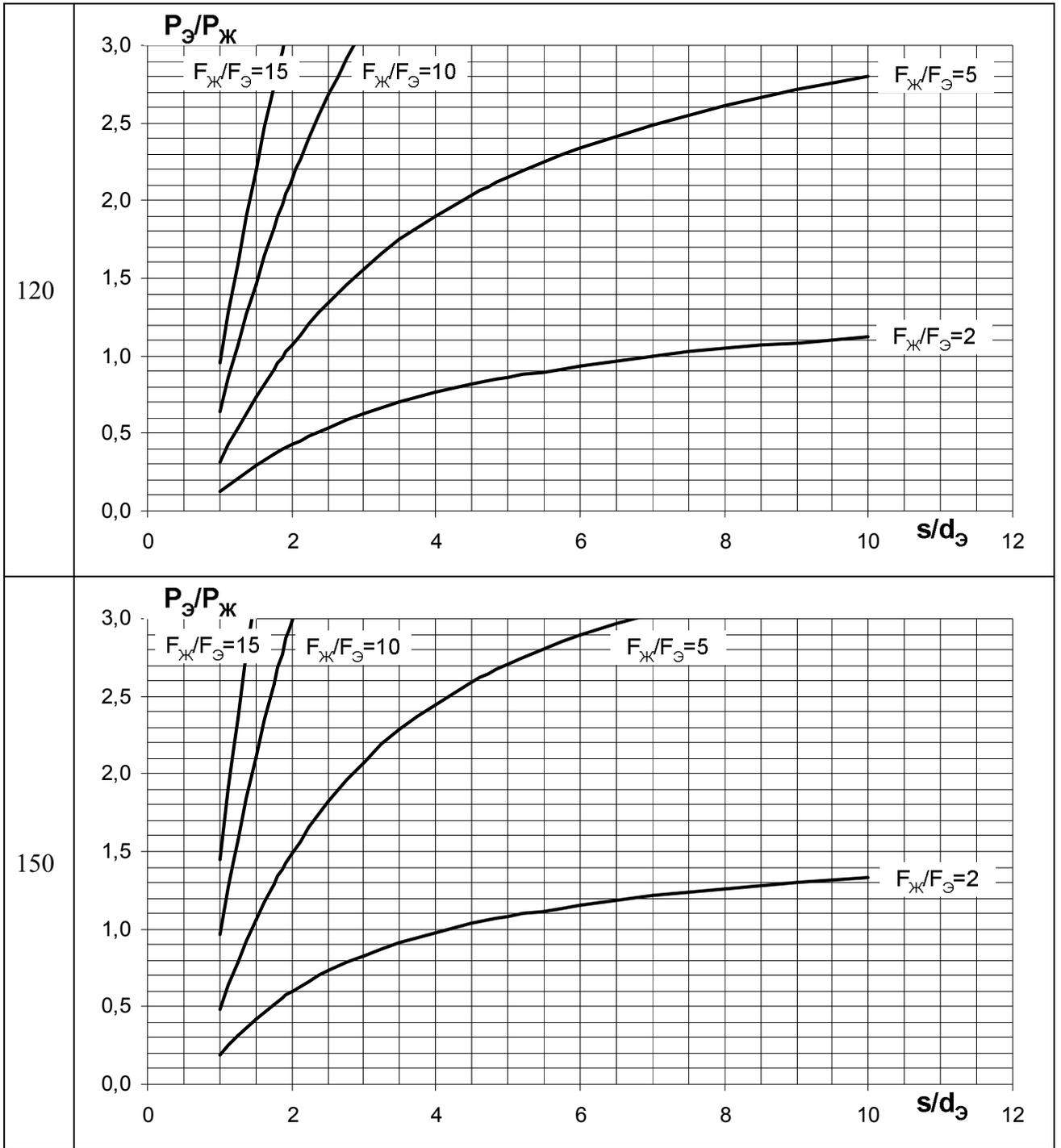


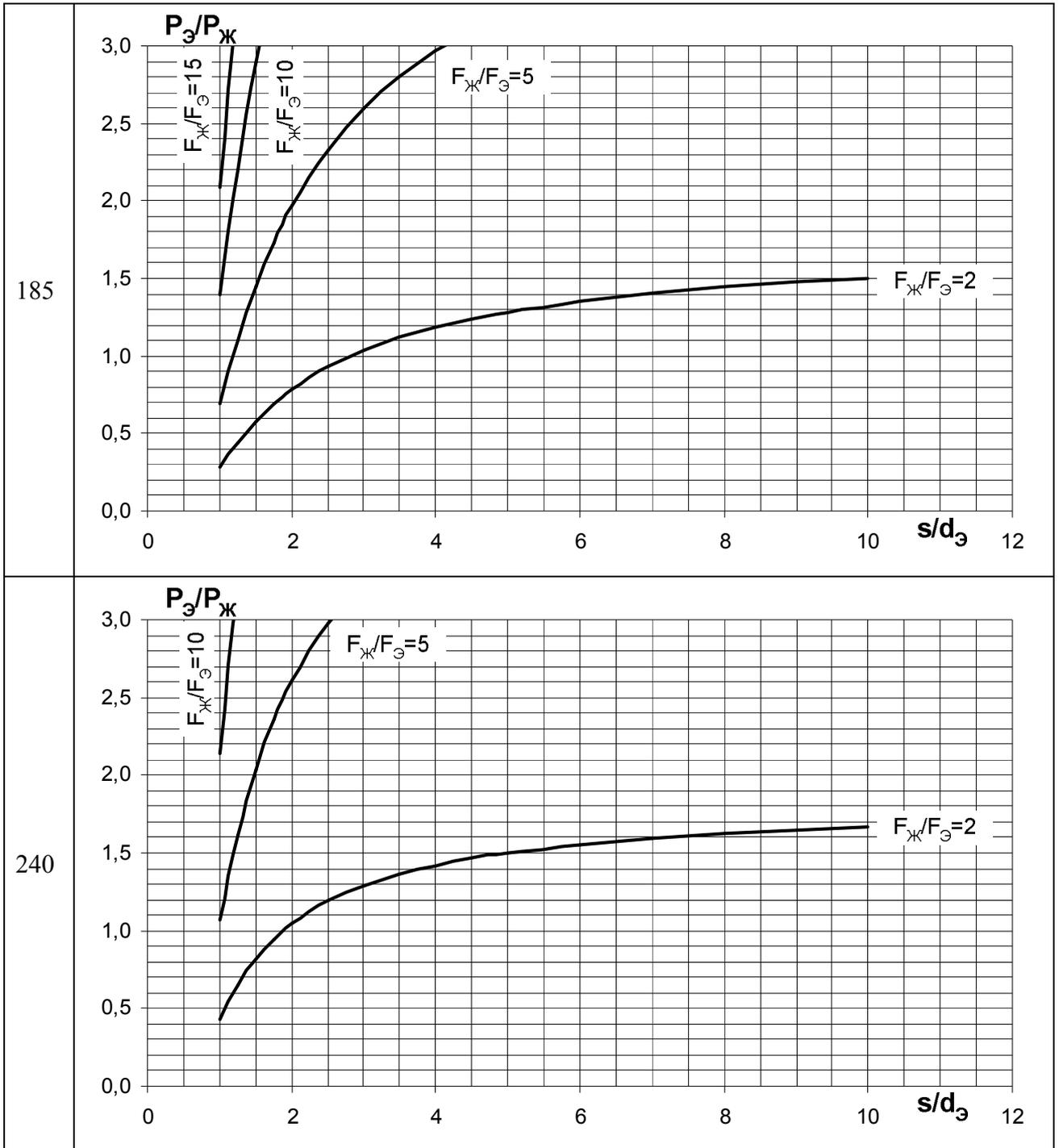
Рис.Б.1. Токи в заземленных по концам экранах кабелей с медной или алюминиевой жилой в зависимости от сечения экрана $F_{\text{э}}$ (мм²) и взаимного расположения фаз $s/d_{\text{э}}$.

Рис.2П. Потери в экранах кабелей с медной жилой в зависимости от сечения экрана $F_{\text{Э}}$, соотношения сечений экрана и жилы $F_{\text{Ж}}/F_{\text{Э}}$ и расстояния между осями фаз $s/d_{\text{Э}}$. В случае алюминиевой жилы $P_{\text{Э}}/P_{\text{Ж}}$ будет в 1.6 раза меньше.









Б.2. Экраны кабеля заземлены с одной стороны

Расчету подлежит наибольшее напряжение на экране относительно земли. Для расчета используют или выражения (1), (2), или обобщающие зависимости рис.Б.3 и рис.Б.4.

В случае, если длина кабеля отличается от 1000 м, а ток в жиле от 1000 А, полученное с помощью рис.Б.3 и Б.4 напряжение на экране необходимо умножить на величину $l_K/1000 \cdot I_{Ж}/1000$, где l_K – в метрах, $I_{Ж}$ – в Амперах.

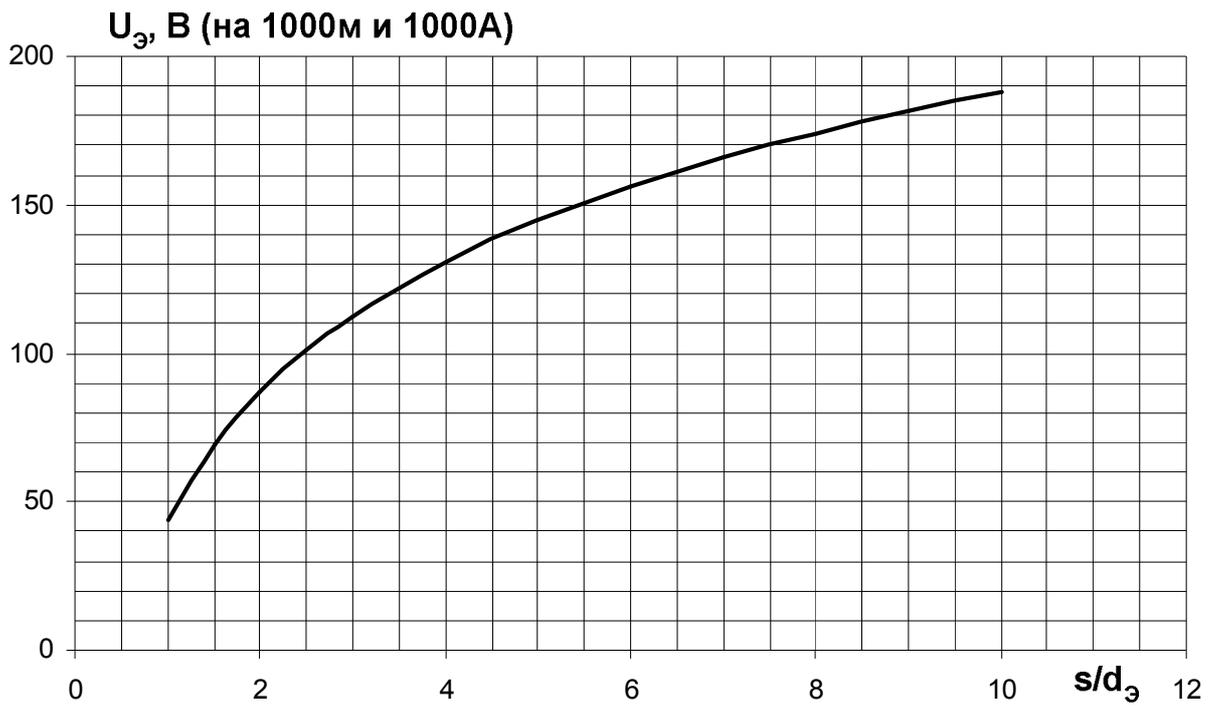


Рис.Б.3. Напряжение на экране кабеля относительно земли для расчетов по (1), (6), (7) в зависимости от соотношения $s/d_э$ для кабеля длиной 1000 м при токе жилы 1000 А.

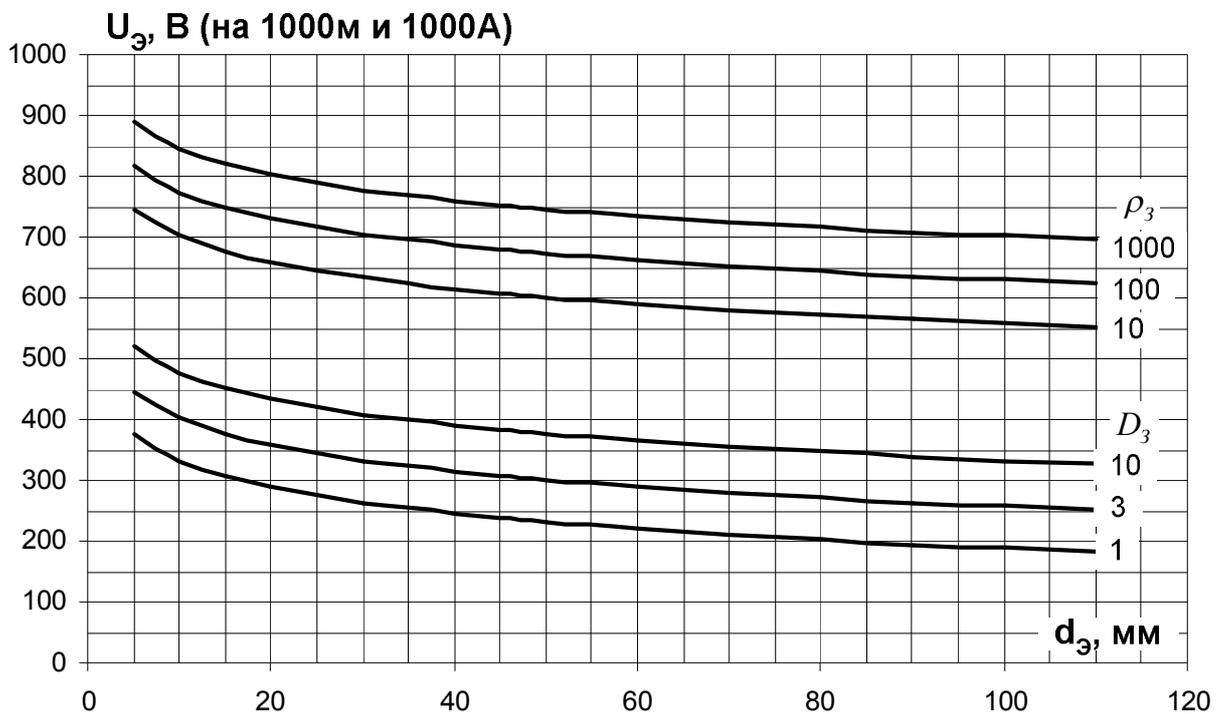


Рис.Б.4. Напряжение на экране кабеля относительно земли для расчетов по (2) в зависимости от диаметра экрана $d_э$ и или сопротивления грунта $\rho_э$ (10, 100, 1000 Ом·м) или глубины $D_э$ (1, 3, 10 м) для кабеля длиной 1000 м при токе жилы 1000 А.

Б.3. Экраны кабеля заземлены по концам и транспонированы

Расчету подлежит наибольшее напряжение на экране относительно земли. В симметричном и несимметричном режиме оно определяется величиной X^* , для расчета которой для расчета используют или выражения (6), (7), или обобщающие зависимости рис.Б.3.

В случае, если длина кабеля отличается от 1000 м, а ток в жиле от 1000 А, полученное с помощью рис.Б.3 напряжение на экране необходимо умножить на величину $l_K/1000 \cdot I_{Ж}/1000$, где l_K – в метрах, $I_{Ж}$ – в Амперах.

Приложение В

Примеры выбора способа заземления экранов

В.1 Предварительные замечания.

Выбор способа заземления экранов КСПЭ при проектировании энергообъектов производится после определения параметров энергосистемы (структурных схем, схем коммутации, расчета токов коротких замыканий и выбора проводников, в т.ч. кабелей). Основными параметрами КСПЭ являются номинальное напряжение и сечение жилы. После разработки главной электрической схемы объекта производится определение схемы заземления экранов КСПЭ.

В.2 Пример выбора схемы заземления экранов для кабеля, проложенного на высоковольтной подстанции 500/220 кВ с КРУЭ.

КСПЭ прокладываются для соединения подходящих к ПС ВЛ и КРУЭ, а также между КРУЭ и автотрансформаторами (АТ).

На стороне 500 кВ используется кабель с параметрами: сечение жилы 2500 мм², сечение экрана 185 мм². Внешний диаметр кабеля 152 мм, внешний диаметр экрана 140 мм. Длины кабелей – до 500 м. Условия прокладки – в кабельном тоннеле, расположение фаз кабеля – в плоскости с расстоянием между соседними фазами, равном внешнему диаметру кабеля. Токи короткого замыкания: токи трехфазного и однофазного замыкания равны 50 кА.

Расчет параметров, необходимых для определения способа заземления.

$$Z_{жэ} - Z_k = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{s}{r_э} = j1,07 \cdot 10^{-4}, \text{ где } s = 1,26 \cdot 2 \cdot (152 \cdot 10^{-3}) = 383 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$Z_{жэ} = R_3 + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_3}{r_э} = 5 \cdot 10^{-5} + j1,67 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м, где } D_3 = 1 \text{ м, т.к. кабель проложен по}$$

территории подстанции.

При заземлении экранов с двух сторон соотношение потерь в экране и жиле составит $P_э/P_ж \approx 7$, коэффициент использования пропускной способности кабеля

$K_{II} = 1/\sqrt{1+P_э/P_ж} = 0.35$. Очевидно, что при наличии потерь в экранах пропускная способность кабеля используется всего на 35%, что недопустимо. Требуется меры по борьбе с потерями в экранах.

Так как длина кабеля менее 1 км, то следует в первую очередь рассмотреть вариант одностороннего заземления экрана. Для этого рассчитываем напряжение на незаземленном конце экрана. Расчет проводим для случая однофазного замыкания. Напряжение на экране равно:

$$U_э = |Z_{жэ}| \cdot I_{кз} \cdot l_k = (1,74 \cdot 10^{-4}) \cdot (50 \cdot 10^3) \cdot (500) = 4,4 \text{ кВ}$$

Очевидно, что при трехфазном коротком замыкании напряжение на экране будет меньше. Полученное напряжение 4,3 кВ меньше рекомендуемого напряжения 5 кВ. Вариант с односторонним заземлением экрана принимается.

В.3 Пример выбора схемы заземления экранов для кабеля 110 кВ в кабельной сети.

Параметры кабеля.

Кабель на напряжение 110 кВ с параметрами: сечение жилы 1200 мм², сечение экрана 185 мм², внешний диаметр кабеля 94 мм, внешний диаметр экрана 82 мм, длина кабеля 10 км.

Прокладка в траншее, расположение жил – «треугольником», удельное сопротивление грунта 300 Ом·м.

Токи короткого замыкания: трехфазного 10 кА, однофазного 15 кА.

Расчет параметров необходимых для определения способа заземления.

$$Z_{жэ} - Z_K = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{s}{r_э} = j0,52 \cdot 10^{-4}, \text{ где } s = 94 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$Z_{жэ} = R_э + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_э}{r_э} = 5 \cdot 10^{-5} + j6,77 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м, где } D_э = 1960 \text{ м, } |Z_{жэ}| = 6,79 \cdot 10^{-4}.$$

При заземлении экранов с двух сторон соотношение потерь в экране и жиле составит $P_э/P_ж \approx 1.32$, коэффициент использования пропускной способности кабеля

$K_{II} = 1/\sqrt{1+P_э/P_ж} = 0.65$. Очевидно, что при наличии потерь в экранах пропускная способность кабеля используется всего на 65%, что недопустимо, учитывая высокую стоимость кабеля. Требуются меры по борьбе с потерями в экранах. Для протяженных кабельных линий в качестве мероприятий по борьбе с потерями одностороннее заземление не пройдет по напряжению, т.е. надо применять транспозицию экранов.

При трехфазном коротком замыкании

$$U_э = \frac{|Z_{жэ} - Z_K| \cdot I_{кз} \cdot l_K}{3N} = \frac{(0,52 \cdot 10^{-4}) \cdot (10 \cdot 10^3) \cdot (10^4)}{3N} = \frac{1.7}{N} \text{ кВ.}$$

При однофазном коротком замыкании

$$U_э = \frac{|Z_{жэ} - Z_K| \cdot I_{кз} \cdot l_K}{9N} = \frac{(0,52 \cdot 10^{-4}) \cdot (15 \cdot 10^3) \cdot (10^4)}{9N} = \frac{2.6}{N} \text{ кВ.}$$

Даже при одном полном цикле транспозиции $N = 1$ напряжение в узле транспозиции будет меньше допустимого значения 5 кВ. Для рассмотренного кабеля достаточно одного полного цикла транспозиции (два цикла не требуется).

Приложение Г

Расчетные формулы для определения напряженности магнитного поля, созданного кабелями

Г.1 Общие положения.

Нормативными документами (СанПиН 2.2.4.1191 – 03, ПОТ РМ-016-2001. РД 15334.0-03.150-00, ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07) устанавливаются ограничения по напряженности МП промышленной частоты.

Нормируемым параметром является напряженность магнитного поля (А/м) или индукция (мкТл). Так как магнитное поле трехфазных токов является эллиптически поляризованным, вектор напряженности в течение периода изменяет свое направление.

Нормируется действующее значение большой полуоси эллипса поляризации.

Для производственных условий установлено время пребывания персонала электроустановок в МП в зависимости от его уровня (см. табл. Г.1).

Таблица Г.1

ПДУ воздействия периодического магнитного поля 50 Гц		
Время пребывания (час)	Допустимые уровни магнитного поля Н (А/м) / В (мкТл) при воздействии	
	общем	локальном
≤ 1	1 600 / 2000	6 400/ 8000
2	800/1000	3 200/4000
4	400/500	1 600/2000
8	80/100	800/1000

При воздействиях на население установлены следующие нормативы (см. табл. Г.2).

Таблица Г.2

Допустимые интенсивности МП при воздействиях на население

№№ п/п	Тип воздействия, территория	Интенсивность МП частотой 50 Гц (действующие значения), мкТл (А/м)
1	В жилых помещениях, детских, дошкольных, школьных, общеобразовательных и медицинских учреждениях	5 (4)
2	В нежилых помещениях жилых зданий, общественных и административных зданиях, на сельтебной территории, в том числе на территории садовых участков	10 (8)
3	В населенной местности вне зоны жилой застройки, в том числе в зоне воздушных и кабельных линий электропередачи напряжением выше 1 кВ; при пребывании в зоне прохождения воздушных и кабельных линий электропередачи лиц, профессионально не связанных с эксплуатацией электроустановок	20 (16)
4	В ненаселенной и труднодоступной местности с эпизодическим пребыванием людей	100(80)

Напряженность (индукция) МП промышленной частоты 50 Гц вне зданий измеряется на высоте 0,5; 1,5 и 1,8 м от поверхности земли.

Г.2 Расчетные формулы

Для расчета МП, созданного КЛ, используются расчетные формулы, выведенные при условии, что длина КЛ как минимум в 10 раз больше расстояния между КЛ и точкой, в которой проводится расчет.

Расчет возможен при условии, что заданы (известны) геометрические размеры КЛ (точнее – координаты осей фаз КЛ).

Для проведения расчета следует составить эскиз расположения фаз КЛ и координат расчетных точек (см. рис.Г.1)

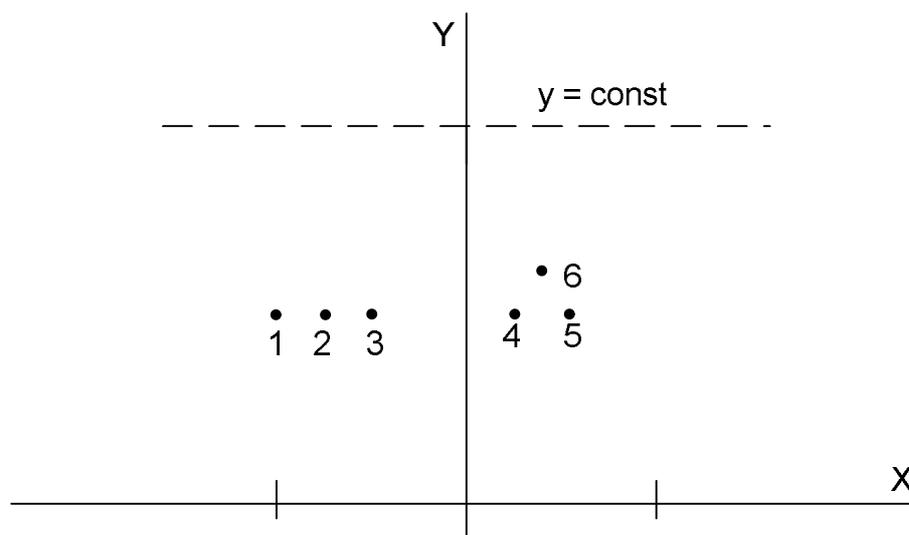


Рис.Г.1 К расчету МП кабельных линий

На рисунке показано положение 2-х КЛ с различным расположением фаз – «в плоскости» и «треугольником». Кабели первой КЛ обозначены цифрами 1,2,3, второй – цифрами 4,5,6.

Горизонтальная пунктирная линия обозначает поверхность, на которой необходимо рассчитать распределение напряженности МП. При составлении эскиза положение начала координат не имеет значения, т.к. напряженность МП определяется через значения токов и расстояния между фазами КЛ и расчетными точками.

Формула для расчета напряженности МП, созданного одной КЛ имеет вид:

$$H_x(x, y, t) = \frac{\bar{I}_1(y - y_1)}{2\pi(r_1(x, y))^2} + \frac{\bar{I}_2(y - y_2)}{2\pi(r_2(x, y))^2} + \frac{\bar{I}_3(y - y_3)}{2\pi(r_3(x, y))^2};$$

$$H_y(x, y, t) = -\left[\frac{\bar{I}_1(x - x_1)}{2\pi(r_1(x, y))^2} + \frac{\bar{I}_2(x - x_2)}{2\pi(r_2(x, y))^2} + \frac{\bar{I}_3(x - x_3)}{2\pi(r_3(x, y))^2} \right], \quad (\text{Г.1})$$

где: $H_x(x, y, t)$ – горизонтальная составляющая напряженности МП, $H_y(x, y, t)$ – вертикальная составляющая напряженности магнитного поля;

x, y – текущие координаты (координаты точки, в которой рассчитывается МП), x_1, y_1 – координаты первого кабеля (фазы А), x_2, y_2 – координаты второго кабеля (фазы В), x_3, y_3 – координаты третьего кабеля (фазы С);

$I_1 = I_{жА} \sin(\omega t) - I_{3А} \sin(\omega t - \alpha)$, $I_2 = I_{жВ} \sin(\omega t - 2\pi/3) - I_{3В} \sin(\omega t - 2\pi/3 - \alpha)$, $I_3 = I_{жС} \sin(\omega t + 2\pi/3) - I_{3С} \sin(\omega t + 2\pi/3 - \alpha)$;

$(r_1(x, y))^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2$, $(r_2(x, y))^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2$, $(r_3(x, y))^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2$ – квадраты расстояний между фазами кабеля и точкой с координатами x, y .

Формула записана в самом общем виде и позволяет учитывать токи в жиле ($I_{жА}$) и в экране ($I_{3А}$) каждой фазы, а также сдвиг по (α) углу между ними.

После расчета составляющих напряженности МП H_x и H_y следует рассчитать модуль напряженности и определить его максимум.

$$H_{норм}(x, y) = \max_t \sqrt{(H_x(x, y, t))^2 + (H_y(x, y, t))^2} \quad (Г.2)$$

В результате будет получено значение большой полуоси эллипса поляризации. Для того, чтобы получить корректный результат, токи в фазах кабеля следует задавать в действующих (эффективных) значениях.

Определение $H_{норм}(x, y)$ проводится путем построения зависимости $H(x, y, t)$ от времени и определения соответствующей фазы.

Для расчета МП от нескольких КЛ, проложенных параллельно, следует рассчитать составляющие напряженности МП H_x , H_y , от каждой КЛ, просуммировать их и вычислять модуль напряженности по формуле

$$H_{норм}(x, y) = \max_t \sqrt{\left(\sum_1^n H_{xi}(x, y, t)\right)^2 + \left(\sum_1^n H_{yi}(x, y, t)\right)^2}. \quad (Г.3)$$

Расчет МП одной КЛ может быть проведен по приближенной формуле

$$H \approx \frac{I \cdot d \cdot \sqrt{3}}{2\pi \cdot r^2}, \quad (Г.4)$$

где I – ток жилы, r – расстояние до рассматриваемой точки над КЛ, d – расчетное расстояние между жилами, равное $d = 1,26s$ для прокладки «в плоскости», $d = 0,58s$ для прокладки «треугольником», s – расстояние между осями соседних фаз.

Формула применима при $r \geq 5d$, погрешность формулы не более 20%.

Для расчета МП нескольких КЛ следует использовать формулы, приведенные в п.2 настоящего приложения.

Г.3.1 Пример расчета МП одной КЛ без учета токов в экране.

Исходные данные для прокладке в зоне жилой застройки.

КЛ проложена в траншее глубиной 1,6 м (по ПЭУ), расстояние между фазами равно 0,3 м. Расчет проводится на высоте 0,5 м над уровнем земли. Ток в жилах равен 1000 А.

Ниже приводятся зависимости от времени составляющих МП и его амплитуды.

Из графиков рис.Д.2 следует, что максимум горизонтальной составляющей H_x во-первых много больше, чем вертикальной H_y , и, во-вторых, они имеют место в разные моменты времени. Максимум модуля H_1 имеет место в момент $t = 0,0057$ с и равен 18,4 А/м, что больше допустимого значения 16 А/м.

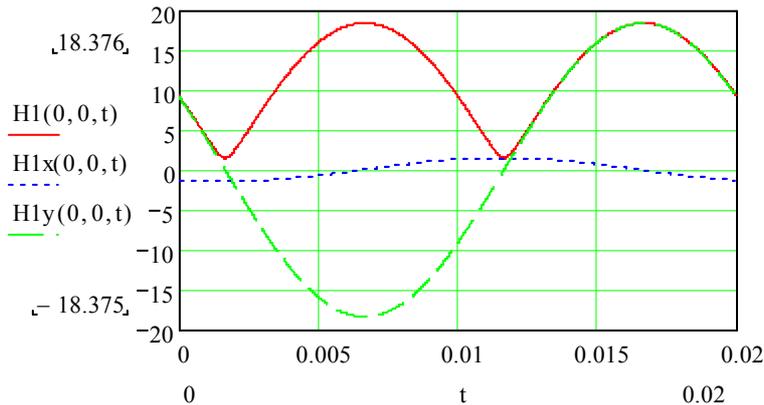


Рис.Г.2 Зависимости от времени составляющих $H_x(t)$, $H_y(t)$ и амплитуды $H_1(t)$ для точки на средней фазой на высоте 0,5 м над землей.

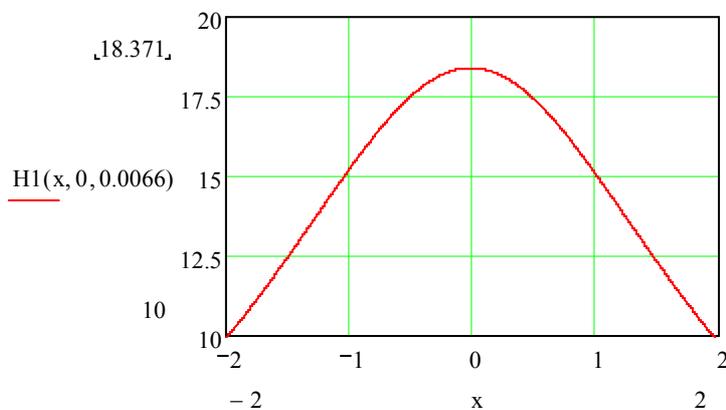


Рис.Г.3 Зависимость модуля напряженности МП от расстояния от оси КЛ в направлении, перпендикулярном направлению прокладки.

Из данных рис.Г.3 следует, что зона, в которой напряженность МП превышает 16 А/м имеет ширину не более 2 м.

При увеличении расстояния между осями фаз КЛ напряженность МП будет уменьшаться. Если принять, что наибольшее расстояние между осями фаз КЛ не превышает 0,4 м, то при укладке кабеля на глубине 1,6 м и при токе не более 660 А, то напряженность МП на высоте 0,5 м над землей не будет превышать допустимое значение 16 А/м. Поэтому в зоне жилой застройки при прокладке КЛ с токами более 660 А следует проводить расчет МП с учетом всех данных по прокладке КЛ.

Г.3.2 Пример расчета МП 2-х КЛ, проложенных на территории подстанции.

Прокладка КЛ на территории подстанций проводится в траншеях на глубине 1 м. Расчет МП проводится на высоте 0,5 м над уровнем земли.

Расстояние между фазами первого кабеля 0,25 м, между фазами второго кабеля, уложенного «треугольником» равно 0,3 м, расстояние между кабелями 1,1 м.

Ток в жиле первого кабеля равен 1000 А, в жиле второго кабеля -600 А со сдвигом 15 град эл. ($\pi/12$). Ток в жилах второго кабеля равен 900 А.

Результаты расчета представлены на рис.Г.4.

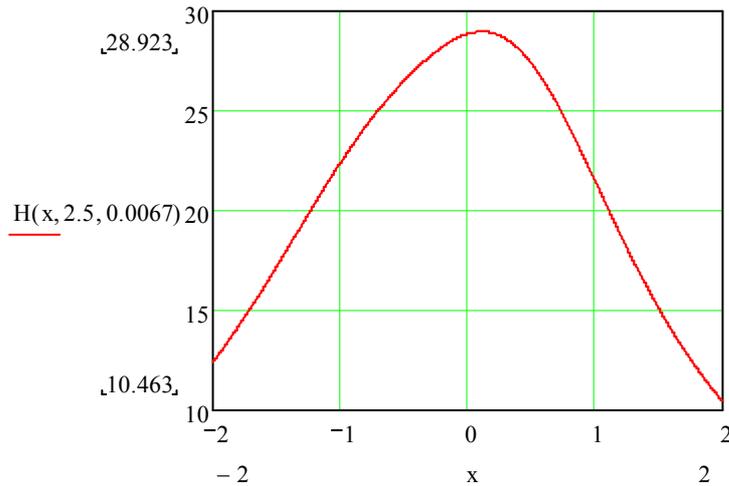


Рис.Г.4 Распределение напряженности МП (А/м) на высоте 0,5 м над уровнем земли в зависимости от расстояния от начала координат в направлении, перпендикулярном оси КЛ.

Расчеты показывают, что напряженность МП не превосходит допустимое значение 80 А/м.

Г.4. Расчеты распределения МН КЛ целесообразно проводить с применением современных математических программ, например, Mathcad. Также можно рекомендовать программу ELMAGLER, разработанную в МЭИ, применяемую для расчета электрических и магнитных полей ВЛ и КЛ.

Приложение Д

Библиография

1. 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.
2. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6-500 кВ//«Новости Электротехники», №2(44), 2007 г. –с.80-85.
3. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. –СПб.: Изд-во «НИВА», 2008. –104 с.
4. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6 – 750 кВ. Методическое и справочное пособие. Под. Ред. М.А. Аронова. – М.: «Знак», 2001.
5. Колечицкий Е.С., Романов В.А., Карташев В.Г. Защита биосферы от влияния электромагнитных полей. –М.: Издательский дом МЭИ, 2008.