

## Выбор системы заземления экранов при расчете сечения кабелей 6 – 500 кВ

Быстров А. В., аспирант, Хевсуриани И. М., канд. техн. наук

НИУ МЭИ, Москва

Предложен алгоритм выбора силовых кабелей напряжением выше 6 кВ. С помощью компьютерной программы, основанной на методе сравнения линий с различными видами систем заземления экранов, проведен расчет сечения кабелей для проекта распределительной сети 20 кВ инновационного центра “Сколково”.

**Ключевые слова:** кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, заземление экранов, ИЩ “Сколково”.

В настоящее время большую долю выпускаемых кабелей среднего (6 – 35 кВ) и высокого (110 – 500 кВ) напряжения составляют кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), неплохо зарекомендовавшие себя в первую очередь благодаря высокой термостойкости [1]. Кроме того, сшитый полиэтилен характеризуется малой диэлектрической постоянной, низким тангенсом угла диэлектрических потерь и высоким удельным сопротивлением. Наибольшее распространение получили одножильные кабели, имеющие небольшой радиус поворота и значительные строительные длины, обеспечивающие возможность удобного монтажа. Как известно, для этих кабелей особенно актуальным является вопрос, касающийся системы заземления экранов, которая влияет на температурный режим линии. Данные системы можно разделить на две группы: с протеканием и без протекания тока по экрану (соответственно замкнутые и разомкнутые экранные контуры) [2 – 4]. При двухстороннем заземлении именно соединение экранов трех фаз приводит к возникновению замкнутых контуров и появлению в них тока [5], что как и отвод теплоты влияет на температурный режим кабеля. Таким образом, выбирать сечение кабеля и систему заземления экранов в проекте необходимо совместно, подтверждая выбор технико-экономическим обоснованием.

### Алгоритм выбора системы заземления

При выборе сечения кабелей с изоляцией из СПЭ среднего и высокого напряжений предварительно выполняют расчет кабельной линии для двух вариантов\* ее исполнения: с замкнутыми и разомкнутыми экранными контурами. Оценив стоимость потерь электр

троэнергии при протекании тока по экранам и затраты на создание системы заземления без потерь в них, определяют сроки окупаемости систем заземления с разомкнутыми и замкнутыми экранами. Сравнивая их на основе экономического критерия, выбирают вариант исполнения кабельной линии.

Негативным фактором в системе с разомкнутыми экранными контурами является наведение напряжения на экране вследствие протекания тока по жиле кабеля. Действующее его значение в аварийном режиме не должно превышать 5 кВ, в нормальном режиме — 100 В. Расчет наводимого напряжения необходимо начинать с одностороннего заземления экранов как более дешевого способа разрыва экранных контуров. В этом случае для несимметричного и симметричного режимов его можно определить соответственно по формулам:

$$U_э = \frac{1}{K} Z_{ж.э2} L I_{max нс}; \quad (1)$$

$$U_э = \frac{1}{K} X L I_{max с}, \quad (2)$$

где  $K$  — количество секций одностороннего заземления экранов;  $Z_{ж.э2}$  — взаимное сопротивление между жилой и экраном;  $L$  — длина трассы;  $I_{max нс}$  и  $I_{max с}$  — максимальные токи при несимметричном (аварийном) и симметричном (нормальном) режимах;  $X$  — разность сопротивлений между жилой и экраном и между жилой и соседним кабелем.

Если расчетные значения превышают допустимые, необходимо предусмотреть две секции одностороннего заземления экранов.

Для снижения наводимого на экране напряжения применим транспозицию экранных контуров, которая может состоять из одного или нескольких циклов. При этом напряжение на экране в несимметричном и симмет

\* Соответственно обозначены цифрами 1 и 2 в индексах параметров.

ричном режиме будет соответственно составлять:

$$U_э = \frac{2}{9N} XLI_{maxнс}; \quad (3)$$

$$U_э = \frac{1}{3N} XLI_{maxс}, \quad (4)$$

где  $N$  — количество циклов транспозиции.

Негативным фактором в системе с замкнутыми экранными контурами является протекание в них тока, который прямо пропорционален току в жиле и связан только с геометрическими параметрами кабеля, но при этом не зависит от его длины:

$$I_э = \frac{I_ж}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_э}{X}\right)^2}}, \quad (5)$$

где  $I_ж$  — ток, протекающий в жиле кабеля;  $R_э$  — сопротивление экрана.

Доля потерь мощности в экране относительно потерь мощности в жиле прямо пропорциональна квадрату доли тока в экране от тока в жиле:

$$D_p = \frac{\Delta P_э}{\Delta P_ж} = \frac{R_э / R_ж}{1 + \left(\frac{R_э}{X}\right)^2}, \quad (6)$$

где  $\Delta P_э$  и  $\Delta P_ж$  — потери мощности в экране и жиле;  $R_ж$  — активное сопротивление жилы;  $D_p$  — доля потерь в экране от потерь в жиле.

Сравнив общие потери мощности в двух вариантах исполнения линии, найдем избыточные потери системы с замкнутыми контурами, учитывающие разность потерь мощности в жилах и экранах кабелей:

$$\Delta P_{12} = \Delta P_{ж1} + \Delta P_{э1} - \Delta P_{ж2} = I_{норм}^2 [R_{ж1}(1 + D_p) - R_{ж2}]L, \quad (7)$$

где  $I_{норм}$  — ток, протекающий в жиле в нормальном режиме.

Согласно [6] (части 3 – 2 “Разделы, касающиеся условий эксплуатации. Экономическая оптимизация размера силовых кабелей”) общая стоимость монтажа и обеспечения функционирования кабеля в течение срока его эксплуатации  $N$

$$CT = CI + CJ, \quad (8)$$

где  $CI$  — стоимость кабельной линии;  $CJ$  — затраты на джоулевы потери в течение срока эксплуатации.

Приравняв общие стоимости в двух вариантах линии, вместо срока эксплуатации получим срок окупаемости:

$$CI_1 + CJ_1 = CI_2 + CJ_2. \quad (9)$$

Разница в стоимости прокладываемых силовых кабелей зависит не только от цен на них (при различных сечениях), но и от стоимости применяемой системы заземления:

$$CI_2 - CI_1 = (C_{к2} + C_{с.з}) - C_{к1}, \quad (10)$$

где  $C_{к1}$  и  $C_{к2}$  — стоимости кабелей  $K_1$  и  $K_2$ ;  $C_{с.з}$  — стоимость обустройства системы заземления.

Разница в затратах на джоулевы потери выражается в стоимости общих избыточных потерь системы с замкнутыми контурами:

$$CJ_2 - CJ_1 = -3\Delta P_{12}CT, \quad (11)$$

где  $C$  — цена на электроэнергию;  $T$  — срок окупаемости.

Решив систему уравнений (9) – (11), вычислим срок окупаемости разомкнутой системы заземления экранов

$$T = \frac{(C_{к2} + C_{с.з}) - C_{к1}}{3\Delta P_{12}C}. \quad (12)$$

Для расчетов по предложенному алгоритму реализована компьютерная программа “Screen Bonding Method”.

### Описание компьютерной программы

Заложенная в программу методика, основанная на расчетах параметров систем заземления [7], усовершенствована путем:

добавления функции выбора сечения жил кабелей по базе конструктивных параметров, что позволяет исключить необходимость применения обобщающих кривых и коэффициента использования кабеля, а также повысить точность расчета потерь в экране;

учета влияния возможной разности сечений жил в двух вариантах;

уточненного подхода к определению срока окупаемости разомкнутой системы;

оптимизации выбора сечения одножильных кабельных линий на напряжение 6 – 500 кВ на стадии проекта.

Окно программы (см. рисунок) разделено на три области: исходные данные, расчет

Выбор системы заземления экранов

**Исходные данные**

Номинальное напряжение сети, кВ

Режим заземления нейтрали

Ток в нормальном режиме, А

Ток в максимальном режиме, А

Коэф. пропускной способности

Длительно допустимый ток, А

Ток трехфазного КЗ, кА

Ток однофазного КЗ, кА

Время отключения КЗ, с

Материал жилы кабеля

Среда прокладки кабеля

Способ прокладки кабеля

По территории ПС

Длина трассы, м

Расстояние между кабелями, мм

Плотность тока в жиле при КЗ, кА/мм<sup>2</sup>

Плотность тока в экране при КЗ, кА/мм<sup>2</sup>

Удельное сопротивление грунта, Ом\*мм

---

**При замкнутых экранных контурах**

F <sub>ж</sub> , мм <sup>2</sup>	F <sub>э</sub> , мм <sup>2</sup>	I <sub>дл.доп</sub> , А	d <sub>ж</sub> , мм	d <sub>э</sub> , мм	d <sub>нар</sub> , мм	L <sub>к</sub> , Гн/м
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**Система заземления экранов**

Доля тока в экране от тока в жиле

Доля потерь в экране от потерь в жиле

Доля избыточных потерь

Годовые избыточные потери, кВт\*ч

Стоимость электроэнергии, руб/(кВт\*ч)

Стоимость кабеля, тыс. руб/м

Срок окупаемости системы с разомкнутыми экранами:  месяцев

---

**При разомкнутых экранных контурах**

F <sub>ж</sub> , мм <sup>2</sup>	F <sub>э</sub> , мм <sup>2</sup>	I <sub>дл.доп</sub> , А	d <sub>ж</sub> , мм	d <sub>э</sub> , мм	d <sub>нар</sub> , мм	L <sub>к</sub> , Гн/м
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**Система заземления экранов**

Количество секций

Максимальное напряжение на экране:

В нормальном режиме, В

В несимметричном режиме, кВ

В симметричном режиме, кВ

Стоимость короба заземления, тыс. руб

Доп. расходы на строительство, тыс. руб

Стоимость кабеля, тыс. руб/м

системы заземления экранов при замкнутом и разомкнутом экранных контурах.

По длительно допустимому току программа выбирает сечение токопроводящей жилы кабеля для каждого варианта исполнения. Созданная для этого база данных содержит характеристики кабелей по пропускной способности в зависимости от уровня напряжения, сечения жилы, способа прокладки (в плоскости или треугольником), среды прокладки (в земле или на воздухе) и наличия тока в экране. Кроме того, в ней для каждого сечения приведены геометрические параметры (диаметр жилы, диаметр по экрану, наружный диаметр), требуемые для расчета погонных параметров кабеля. База представлена в формате Microsoft Excel и доступна для редактирования при наличии всех необходимых характеристик и параметров от конкретного производителя. Изначально она заполнена данными фирмы "ABB" [8], представленными в каталогах кабельной продукции.

Можно не пользоваться функцией выбора кабеля, а просто заполнить таблицу характе-

ристик известными значениями сечения жилы ( $F_{ж}$ ), сечения экрана ( $F_{э}$ ), длительно допустимого тока ( $I_{дл.доп}$ ), диаметра жилы ( $d_{ж}$ ), диаметра экрана ( $d_{э}$ ), наружного диаметра кабеля ( $d_{нар}$ ), индуктивности кабеля ( $L_{к}$ ).

Программа рассчитывает параметры систем заземления экранов [7, 9]. Для двухстороннего заземления выводятся доли тока в экране от тока в жиле и доли потерь в экране от потерь в жиле, рассчитываются избыточные потери, учитывающие возможную разницу сечений жилы в сравниваемых вариантах. Для одностороннего заземления экранов указываются расчетное количество секций и максимальные напряжения на экране в симметричном и несимметричном режимах, по которым можно убедиться, что они не превышают допустимых значений: 5 кВ (для аварийных режимов) и 110 В (для нормального режима).

Срок окупаемости системы заземления с разомкнутыми экранами вычисляется исходя из разницы стоимостей двух вариантов исполнения линии, которые складываются из

цены прокладываемых кабелей, затрат на создание системы заземления и затрат вследствие потерь. Для расчета необходимо ввести стоимость электроэнергии, кабелей, короба заземления и ориентировочных дополнительных затрат на покупку и создание системы заземления экранов на момент реализации проекта.

По результатам расчета программа формирует отчет в виде документа Microsoft Word, который можно приложить к проектной документации. Отчет содержит полное описание системы кабельной линии на основе введенных пользователем исходных данных, а также все промежуточные формулы и расчеты активных и реактивных сопротивлений, взаимных индуктивностей, которые не выводятся в окне программы, но необходимы для расчетов параметров замкнутой и разомкнутой систем заземления экранов.

### Результаты расчета

Рассмотрим работу программы на примере выбора кабелей для распределительной сети 20 кВ инновационного центра “Сколково”. Электроснабжение района предполагается осуществлять от трех независимых центров питания: подземных подстанций (ПС) 220/20 кВ “Сколково” и “Союз” и планируемой на перспективу ПС 220/20 кВ “Минская”. В состав распределительной сети входят 15 распределительных трансформаторных подстанций 20/0,4 кВ.

Исходные данные кабельных линий взяты из проекта. Номинальное напряжение сети — 20 кВ, нейтраль — резистивно-заземленная. В центрах питания установлены силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток Ун/Ун-Ун-0-0, где нейтраль 20 кВ заземлена через низкоомный резистор сопротивлением 11,55 Ом. Максимальные токи в аварийном режиме выбираются для начала линии — шин ЗРУ 20 кВ центров питания. Трехфазные токи КЗ составляют: для ПС 220/20 кВ “Сколково” — 6,1 кА, ПС 220/20 кВ “Союз” — 8 кА, ПС 220/20 кВ “Минская” — 8,8 кА. Однофазный ток КЗ (1 кА) зависит от сопротивления резисторов. Согласно проекту по релейной защите и автоматике длительность отключения КЗ выключателями отходящих фидеров КРУ 20 кВ составляет 1 с.

Предварительно были намечены трассы прокладки для определения длины линий. Материалом для жил кабеля выбрана медь, имеющая большую пропускную способность по току, чем алюминий. Среда при проклад-

ке в коллекторе — воздух, способ прокладки — треугольником. При этом требуется меньше места, чем при прокладке в плоскости (выгодно при большом числе линий в стесненном пространстве). В коллекторе по всей длине проложен контур заземления для присоединения к нему всех металлоконструкций. Плотность тока при КЗ: в жиле — 0,203 кА/мм<sup>2</sup>, в экране — 0,165 кА/мм<sup>2</sup>. Длину трассы определяли исходя из размещения распределительной трансформаторной подстанции (РТП) на генплане территории инновационного центра и с учетом расположения закладных труб для выхода из коллектора, мест ввода в здания ПС, оценки мест для прохождения траншей от коллектора до РТП в городской застройке.

Значения токов, протекающих по линиям в нормальном (от 144 до 304 А) и максимальном (от 297 до 655 А) режимах, взяты из проекта расчета режимов сети 20 кВ. Для определения требуемого длительно допустимого тока кабеля необходимо учитывать коэффициент пропускной способности линии [6]. При прокладке на воздухе во внимание принимаются поправочные коэффициенты  $k$  на температуру окружающего воздуха и на групповую прокладку. Максимальная расчетная температура воздуха в коллекторе — 50 °С ( $k = 0,83$ ). Кабели прокладывают по консолям с двухсторонним расположением (по 5 консолей на каждой стороне). Консоли расположены одна над другой с шагом 300 мм — по две линии на каждой с расстоянием между цепями 225 мм ( $k = 0,95$ ). Таким образом, с учетом изложенного коэффициент пропускной способности принят равным 0,7885.

В результате расчета, выполненного для тридцати кабельных линий, соединяющих центры питания с РТП, получены сечения жил. Для унификации распределительной сети для всех кабелей были приняты сечения жила/экран 500/35 мм<sup>2</sup>. В качестве разомкнутой системы при расчетах программы достаточно использовать одностороннее заземление экранов. Для трех линий длиной более 6450 м от ПС “Минская” до трех РТП из-за превышения допустимого напряжения на экране необходимо строительство двух секций одностороннего заземления.

Проанализируем параметры замкнутой и разомкнутой систем заземления экранов. Так, для двухстороннего заземления кабеля 500/35 мм<sup>2</sup> доля тока в экране относительно тока в жиле составляет 0,111, а доля избы-

точных потерь — 0,175. В абсолютных значениях избыточные потери зависят от длины линии. Например, на одной из наиболее протяженных трасс «ПС «Минская» — РТП 2» (6460 м, 273 А) они составят 9,09 кВт. Одностороннее заземление выполняется из двух секций. Максимальное напряжение на разомкнутых концах экрана в нормальном режиме — 50,5 В, в аварийных: несимметричном — 0,77 кВ, в симметричном — 1,1 кВ. Для односекционного одностороннего заземления максимальное напряжение на разомкнутом конце экрана будет на линии «ПС «Сколково» — РТП 13» (5860 м, 230 А): в нормальном режиме — 91,6 В, в несимметричном — 1,405 кВ, в симметричном — 1,572 кВ.

Далее для каждой линии определили срок окупаемости  $T$  системы с разомкнутыми экранами. Цена на электроэнергию была принята равной 3 руб/(кВт·ч), а стоимость коробка заземления — 50 тыс. руб. Для реализации одностороннего заземления необходимы два короба: с прямым присоединением к контуру заземления и с подключением через ограничитель перенапряжения (ОПН). Для двух секций возможно применение трех коробов, когда в середине трассы экран присоединяется напрямую к контуру заземления, а на концах — через ОПН. К дополнительным расходам можно отнести: стоимость специального кабеля, соединяющего короб с экраном, если длины оплетки последнего будет недостаточно; надбавку монтажнику за сборку короба и подключение к нему экрана и т. д. [10]. Всего на каждую линию ориентировочно предполагается израсходовать 100 тыс. руб. В данном случае в обоих вариантах стоимости кабеля совпадают и, следовательно, не влияют на результаты расчета.

Согласно расчетам, проведенным для всех линий, в среднем одностороннее заземление окупается за 51 мес. (чуть больше 4 лет) при минимальном требуемом сроке службы кабеля 30 лет. При этом учитывается зависимость от длины трассы и загрузки кабеля. Например, для самой короткой кабельной линии

«ПС «Минская» — РТП 13» (140 м, 228 А) необходимость его применения, которое окупится лишь через 41 год, не столь очевидна, как для основной части линий (их окупаемость составляет от 2 до 5 лет). Для наиболее протяженных линий, которые к тому же имеют наибольшую нагрузку, например «ПС «Минская» — РТП 1» (6470 м, 269 А), использование разомкнутой системы заземления экрана высокоэффективно, при этом срок ее окупаемости составляет менее 1 года.

На основе проведенных расчетов для проекта распределительной сети 20 кВ инновационного центра «Сколково» рекомендуется применять кабели с медной жилой и изоляцией из сшитого полиэтилена сечением  $1 \times 500/35 \text{ мм}^2$  с односторонним заземлением экрана.

### Список литературы

1. Боев А. Сравнение кабелей с БПИ и СПЭ-изоляцией. — Кабель-NEWS, 2010, № 11.
2. IEEE Standard 575–1988. Guide for the application of sheath-bonding methods for single-conductor cables and the calculation of induced voltages and currents in cable sheaths.
3. Anders G. J. Rating of Electric Power Cables — Ampacity Computation for Transmission, Distribution and Industrial Applications. — IEEE Press Power Engineering Series, 1997.
4. Moore G. F. Electric cables handbook. Third Edition. — BICC Cables, 1997.
5. Ковригин Л. А. Продольные токи в экранах кабелей. — Кабель-NEWS, 2009, № 3.
6. ГОСТ Р МЭК 60287–2011. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки.
7. Дмитриев М. В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.
8. Кабельные системы с изоляцией из сшитого полиэтилена. Руководство пользователя. — Каталог фирмы ABB.
9. Guide to Sheath Bonding Design, in Distribution and Transmission Lines with HV Underground Cables / F. Garnacho, A. Khamlichi, P. Simon, A. Gozalez. — B1 – 105 Session, CIGRE 2012.
10. Дмитриев М. В. Выбор и реализация схем заземления экранов однофазных кабелей 6–500 кВ. — Электроэнергия. Передача и распределение, 2013, № 6 (21).

bystrovlexa@gmail.com