



**Иван Павлович  
Неугодников**  
Ivan P. Neugodnikov



**Алексей Александрович  
Косяков**  
Alexei A. Kosyakov

# Автоматизация расчета силовых кабелей 6–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена

## Automation of design of 6–500 kV power cables with XLPE insulation

### Аннотация

В статье описаны физические процессы, происходящие в силовых кабелях 6–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, принцип выполнения расчетов кабелей, предложен метод автоматизации расчетов и его программная реализация.

**Ключевые слова:** проектирование, силовой кабель, экранирование, расчет токов, транспозиция, автоматизация.

### Abstract

This article describes the physical processes occurring in the 6–500 kV power cables with XLPE insulation, cables design principle; a method for automating design and its implementation is proposed.

**Keywords:** design, power cable, shielding, current analysis, transposition, automation.

### Авторы Authors

**Иван Павлович Неугодников**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения; e-mail: ipneu@e1.ru | **Алексей Александрович Косяков**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения, начальник отдела релейной защиты, управления и связи дирекции «Энергосетьпроект» ОАО «Инженерный центр энергетики Урала»; e-mail: kosakov@yandex.ru

**Ivan Pavlovich Neugodnikov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport; e-mail: ipneu@e1.ru | **Alexei Alexandrovich Kosyakov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport, Head of Relay Protection, Control and Communication Department of Energosetproekt Directorate, JSC Ural Energy Engineering Center, e-mail: kosakov@yandex.ru

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) напряжением 6–500 кВ, постепенно вытесняющих из эксплуатации все другие кабели традиционного исполнения [1].

Кабели с изоляцией из СПЭ рекомендуется применять в электрических сетях в следующих случаях:

- при передаче большой электрической мощности по кабельной линии (КЛ);
- для обеспечения высокого уровня надежности передачи электрической энергии по КЛ;
- при выполнении проекта КЛ, трасса которой проходит по территории с большой разностью высот (уровней прокладки);
- при выполнении проекта КЛ с повышенным уровнем экологической и пожарной безопасности.

В связи с особенностями технологии производства кабели с изоляцией из СПЭ в основном выпускаются однофазными, при этом трехфазная передача электроэнергии обеспечивается укладкой трех отдельных кабелей. Для обеспечения требований электробезопасности и механической прочности кабелей применяют металлические экраны или броню. Наличие в кабельной линии электропередачи трех отдельных однофазных кабелей, каждый из которых имеет экран, приводит к появлению напряжений на экранах кабелей. Для снижения напряжений на экранах выполняется их заземление в одной или нескольких точках, при этом в экранах кабелей протекают токи [2].

При проектировании КЛ с изоляцией из СПЭ одной из основных и сложных задач является выбор способа заземления экрана кабеля, который влияет:

- на величину тока в экране в нормальных и аварийных режимах (неправильный выбор сечения экрана может привести к повреждению кабеля);

- на электрические потери в экране (на тепловой режим и пропускную способность кабеля);
- на величину напряжения на экране в нормальных и аварийных режимах (на безопасность обслуживания и надежность работы кабеля).

В связи с этим крупнейшим собственником магистральных электрических сетей Российской Федерации ОАО «ФСК ЕЭС» были разработаны следующие стандарты по применению кабелей с изоляцией из СПЭ напряжением 10–500 кВ:

- СТО 56947007–29.060.20.020–2009 «Методические указания по применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ и выше»;
- СТО 56947007–29.060.20.071–2011 «Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования»;
- 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».

Данные стандарты отличаются сложностью и при расчетах «вручную» занимают до двух недель рабочего времени ведущего инженера-проектировщика на каждую КЛ, поскольку данные расчеты являются итеративными, скорость их выполнения в значительной мере зависит от опыта и квалификации инженера-проектировщика. Необходимость выполнения расчетов в соответствии с упомянутыми СТО ОАО «ФСК ЕЭС» встречается не только для КЛ, являющихся достаточно редким объектом проектирования в связи с высокой стоимостью строительства, но и также для заходов КЛ на подстанции (ПС), кабельных вставок различного назначения на ПС, встречающихся практически на любой ПС 110 кВ и выше.

Востребованность, распространенность в проектировании, итеративность и трудоемкость расчетов привели авторов к пониманию необходимости автоматизации расчетов. Анализ программного обеспечения по расчету кабелей с изоляцией из СПЭ показал, что существующее программное обеспечение по выполнению таких расчетов имеется на заводах-изготовителях кабельной продукции, но оно «привязано» к конкретной кабельной продукции завода и не выполняет требований стандартов ОАО «ФСК ЕЭС». Попытки применения заводского программного обеспечения для разработки проектной продукции на стадиях проектной документации и конкурсной документации приводили к появлению конкурентных преимуществ у того завода-изготовителя, программное обеспечение которого использовалось для расчетов, что не устраивало заказчика проектной продукции — ОАО «ФСК ЕЭС». Кроме того, возникли замечания ФАУ «Главгосэкспертиза России» к проектной документации, не соответствующей техническим заданиям на проектирование, в которых прописана обязательность использования СТО 56947007–29.060.20.020–2009, СТО 56947007–29.060.20.071–2011 и СТО 56947007–29.060.20.103–2011 при разработке проектной документации.

**Решением поставленной задачи явилась разработка программы Calc-C [3], предназначенной для автоматизации расчета и выбора сечений жил и экранов кабелей, а также для формирования рекомендаций по выбору способа заземления экрана.**

Программа имеет следующие функциональные возможности:

- 1) расчет сечений жилы и экрана кабеля по токам короткого замыкания (КЗ);
- 2) расчет сечений жилы и экрана кабеля по длительно допустимым токам;
- 3) расчет коэффициента использования жилы по току при заземлении экрана кабеля с двух сторон;
- 4) расчет напряжения на экране кабеля при заземлении экрана кабеля с одной стороны;
- 5) выбор способа заземления экрана кабеля;
- 6) формирование отчета.

Первая версия программы была выполнена в конце 2011 года. В течение 2012 года проводилась опытная эксплуатация программы на пяти электросетевых объектах ОАО «ФСК ЕЭС», двух объектах ОАО «Сургутнефтегаз» и двух объектах ОАО «Холдинг МРСК», прошедших государственную экспертизу в ФАУ «Главгосэкспертиза России». В ходе опытной эксплуатации проводилась доработка программы. В начале 2013 года программа Calc-C прошла государственную регистрацию.

**В середине 2013 года первые электросетевые объекты, построенные по проектам, выполненным с учетом результатов расчетов с использованием программы Calc-C, введены в эксплуатацию, при этом в ходе пусконаладочных работ значительных отклонений фактических значений токов и напряжений в кабелях с изоляцией из СПЭ от расчетных не выявлено.**

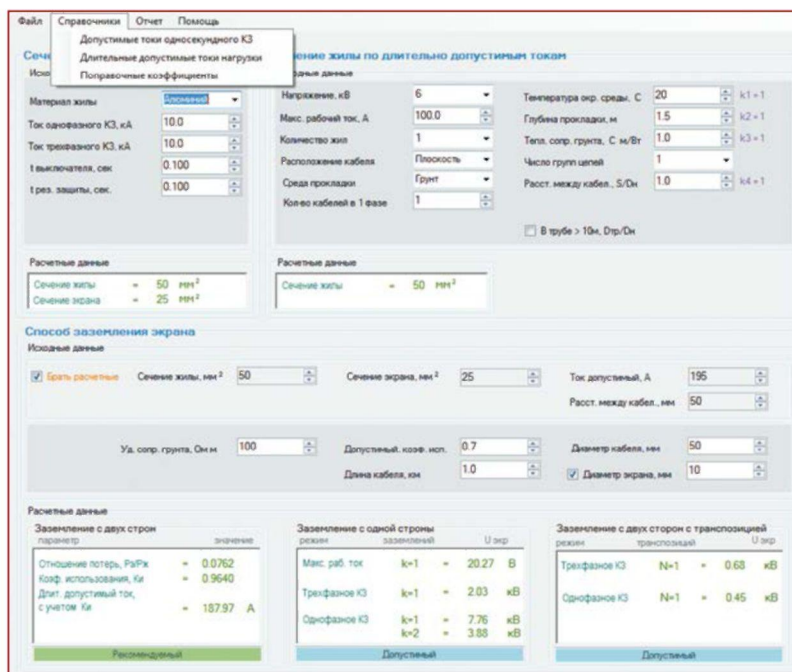


Рис. 1. Интерфейс программы Calc-C

Всего на разработку программы в течение 2011–2013 годов было потрачено 650 тысяч рублей. При ее использовании в 2012–2013 годах достигнут экономический эффект в размере 430 тысяч рублей за счет сокращения времени выполнения расчетов ведущим инженером-проектировщиком с двух недель без использования программы Calc-C до одного рабочего дня с использованием программы (расчет времени — по одному электросетевому объекту).

На рис. 1 приведен интерфейс программы Calc-C [3]. Главная форма программы содержит поля для ввода исходных данных. После за-

пуска приложения эти поля содержат некоторые начальные значения, при необходимости пользователь их изменяет.

Ввод или изменение исходных данных производится путем выбора из списка, прокруткой значений или вводом с клавиатуры. При этом результаты расчета незамедлительно отображаются в полях расчетных данных.

После завершения ввода значения с клавиатуры для отображения результатов расчетов необходимо нажать «Enter» на клавиатуре. Также данные можно загрузить из ранее сохраненного файла. В справочниках (рис. 2) содержатся исходные

The screenshot shows a table titled 'Длительно допустимые токи нагрузки, А' (Long-term permissible load currents, A). The table is organized by voltage level and cable type.

Сечение, мм²	И жилы при прокладке кабеля в земле, А				И жилы при прокладке кабеля на воздухе, А			
	медь		алюминий		медь		алюминий	
	плоскость	треугольник	плоскость	треугольник	плоскость	треугольник	плоскость	треугольник
50	250	225	195	170	290	240	225	185
70	310	275	240	210	360	300	280	230
95	336	306	263	253	448	387	349	300
120	380	370	298	288	515	445	403	346
150	416	413	329	322	574	503	452	392
185	466	466	371	364	654	577	518	450
240	531	537	426	422	762	677	607	531
300	590	604	477	476	865	776	693	609
400	633	677	525	541	959	891	787	710
500	697	759	587	614	1081	1025	900	822
630	762	848	653	695	1213	1166	1026	954
800	825	933	719	780	1349	1319	1161	1094

Рис. 2. Длительно допустимые токи нагрузки в меню «Справочники»

**Сечения жилы и экрана по току КЗ**

Исходные данные

Материал жилы: **Алюминий**

Ток однофазного КЗ, кА: **10**

Ток трехфазного КЗ, кА: **10**

t выключателя, сек: **0.10**

t рез. защиты, сек: **0.1**

---

Расчетные данные

Сечение жилы = **50 мм<sup>2</sup>**

Сечение экрана = **25 мм<sup>2</sup>**

Рис. 3. Интерфейс поля для расчета сечения жилы и экрана кабеля по токам КЗ

данные по допустимым токам и поправочным коэффициентам в соответствии с указанными стандартами ОАО «ФСК ЕЭС», которые доступны для просмотра и используются программой для расчетов.

Для того чтобы рассчитать сечения жилы и экрана кабеля по токам КЗ, достаточно ввести исходные данные в соответствующие для этого расчета поля. Результат отображается ниже в расчетных данных (рис. 3).

Интерфейс поля для расчета сечения жилы кабеля по длительно допустимым токам приведен на рис. 4. Справа отображаются вычисленные поправочные коэффициенты для условий прокладки.

Третьим этапом расчета кабеля является выбор способа заземления экрана, который проводится с помощью интерфейса поля (рис. 5).

В соответствии со стандартами ОАО «ФСК ЕЭС», программа Calc-S рассчитывает и предлагает инженеру-проектировщику на выбор один из трех способов заземления экрана кабеля [2]:

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

Допускается применение разных способов заземления экранов по трассе КЛ, включая многократное

**Сечение жилы по длительно допустимым токам**

Исходные данные

Напряжение, кВ: **220**

Макс. рабочий ток, А: **100**

Количество жил: **1**

Расположение кабеля: **плоскость**

Среда прокладки: **грунт**

Кол-во кабелей в 1 фазе: **1**

Температура окр. среды, С: **25**  $k1 = 0.97$

Глубина прокладки, м: **1.0**  $k2 = 1.04$

Тепл. сопр. грунта, С м/Вт: **0.4**  $k3 = 1.37$

Число групп цепей: **2**

Расст. между кабел., С/Дн: **1.0**  $k4 = 1$

Расст. между группами С, м: **0.1**  $k5 = 0.87$

В трубе > 10м, Дтр/Дн: **1.5**  $k6 = 0.9$

---

Расчетные данные

Сечение жилы = **240 мм<sup>2</sup>**

Рис. 4. Интерфейс поля для расчета сечения жилы кабеля по длительно допустимым токам

**Способ заземления экрана**

Исходные данные

брать расчетные Сечение жилы, мм: **400** Сечение экрана: **150** Ток допустимый, А: **594**

Уд. сопр. грунта, Ом/м: **100** Допустимый коэф. исп.: **0.7** Диаметр кабеля, мм: **50**

Диам. кабеля, мм: **1.0**  Диаметр экрана, мм: **10**

---

Расчетные данные

Заземление с двух сторон	Значения	Заземление с одной стороны	У экр.	Заземление с двух сторон с транспозицией	У экр.
Отношение потерь, Ра/Рз	= 1.1670	Макс. раб. ток	k=1 = 20.27 В	Трехфазное КЗ	N=1 = 0.74 кВ
Коэф. использования, Ки	= 0.6793	Трехфазное КЗ	k=1 = 2.23 кВ	Однофазное КЗ	N=1 = 2.97 кВ
Длит. ток реаль. общий	= 403.58 А	Однофазное КЗ	k=1 = 51.22 кВ		
			k=11 = 4.66 кВ		

Недопустимый      Допустимый      Рекомендуемый

Рис. 5. Интерфейс поля для выбора способа заземления экрана кабеля

повторение одного и того же способа заземления (рис. 6, 7).

Практика проектирования и эксплуатации кабелей с изоляцией из СПЭ показывает, что при заземлении экрана кабеля с двух сторон по нему может протекать ток, соизмеримый с током жилы кабеля. Протекание тока по экрану в рабочем режиме вызывает дополнительные потери мощности и нагрев кабеля, то есть в этом случае уменьшается пропускная способность кабеля.

Связь длительно допустимого тока в жиле кабеля при наличии по-

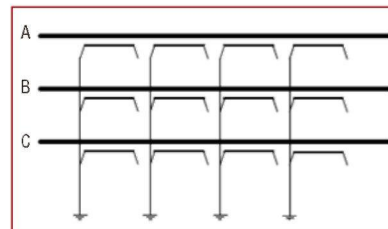


Рис. 6. Разделение экранов кабелей на  $K = 4$  отдельных секции, каждая из которых заземлена только один раз

терь в экране ( $I_{доп}$ ) и при их отсутствии (идеальный случай) ( $I_{доп.ид}$ ) может быть оценена по формуле (5) СТО 56947007–29.060.20.103–2011

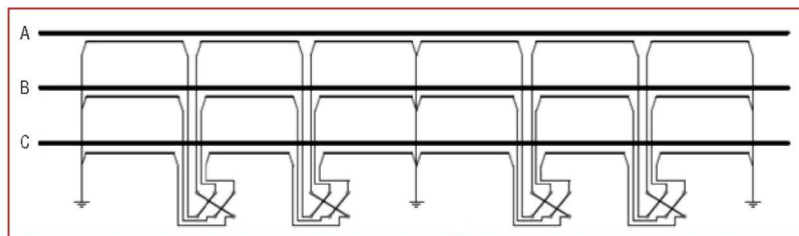


Рис. 7. Заземление экранов кабелей с двойным полным циклом транспозиции и заземлением средней точки

$$\frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{доп.ид}}} = K_{\text{и}}, \quad (1.1)$$

где  $K_{\text{и}}$  — коэффициент использования, характеризующий степень использования пропускной способности однофазного кабеля, равный

$$K_{\text{и}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{P_{\text{э}}}{P_{\text{ж}}}\right)}}. \quad (1.2)$$

При заземлении экрана с двух сторон длительно допустимый ток в жиле кабеля при наличии потерь в экране  $I_{\text{доп}}$  должен быть меньше максимального рабочего тока, а коэффициент использования пропускной способности кабеля  $K_{\text{и}}$  близок к величине 0,9–1,0, что обеспечивает экономическую эффективность использования кабеля с изоляцией из СПЭ.

Заземление экрана с одного конца, как правило, используется для кабелей длиной не более 1 км. При длине кабеля более 1 км допускается использовать многократное заземление экрана с одного конца (рис. 6). В случае заземления экрана с одной стороны на незаземленном конце экрана кабеля наводится напряжение промышленной частоты относительно земли в нормальном режиме работы сети и при КЗ.

В симметричном режиме (при протекании рабочего тока или тока трехфазного КЗ) наибольшее напряжение на экране кабеля относительно земли определяют по формуле (таблица А.2 СТО 56947007–29.060.20.103–2011)

$$U_{\text{э}} = \frac{|Z_{\text{жз}} - Z_{\text{к}}| \cdot I_{\text{ж}} \cdot I_{\text{к}}}{K}. \quad (1.3)$$

Модуль  $|Z_{\text{жз}} - Z_{\text{к}}|$  определяется по формулам А.3–А.5, А.8 и А.10 СТО 56947007–29.060.20.103–2011.

В несимметричном режиме (при протекании тока однофазного КЗ) наибольшее напряжение на экране кабеля относительно земли определяют по формуле (таблица А.2 СТО 56947007–29.060.20.103–2011)

$$U_{\text{э}} = \frac{|Z_{\text{жз}}| \cdot I_{\text{ж}} \cdot I_{\text{к}}}{K}. \quad (1.4)$$

Модуль  $|Z_{\text{жз}}|$  определяется по формулам А.3, А.5, А.8 и А.9 СТО 56947007–29.060.20.103–2011.

Действующее значение напряжения на незаземленном конце экрана относительно земли при КЗ не должно превышать 5 кВ (п. 4.2.1.7 СТО 56947007–29.060.20.103–2011). По требованиям электробезопасности напряжение на разомкнутом конце экрана относительно земли в рабочих режимах не должно превышать 25 В (п. 4.2.1.6 СТО 56947007–29.060.20.103–2011). Если эти требования не выполняются, то необходимо или отказаться от одностороннего заземления экрана, или увеличить число секций одностороннего заземления кабеля (рис. 6).

Заземление экранов кабелей с обоих концов с применением транспозиции используется, как правило, в протяженных (более 1 км) кабельных линиях. При разбиении экрана на одинаковые участки в симметричном режиме работы токи в экранах практически отсутствуют. 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 форму-

ле (таблица А.2 СТО 56947007–29.060.20.103–2011)

$$U_{\text{э}} = \frac{|Z_{\text{жз}} - Z_{\text{к}}| \cdot I_{\text{ж}} \cdot I_{\text{к}}}{3 \cdot N}; \quad (1.5)$$

- в несимметричном режиме (при протекании тока однофазного КЗ) по формуле (таблица А.2 СТО 56947007–29.060.20.103–2011)

$$U_{\text{э}} = \frac{2 \cdot |Z_{\text{жз}} - Z_{\text{к}}| \cdot I_{\text{ж}} \cdot I_{\text{к}}}{9 \cdot N}. \quad (1.6)$$

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 транспозиции  $N$  (рис. 7).

Программа для расчета кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена Calc-C производит расчет вышеприведенных величин и дает рекомендации о применимости каждого способа заземления экрана кабеля, однако решение об использовании того или иного способа заземления экранов кабелей с изоляцией из СПЭ остается за инженером-проектировщиком.

В настоящее время программа Calc-C успешно применяется в ОАО «Инженерный центр энергетики Урала» для автоматизации расчета КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена при проектировании электросетевых объектов, что позволяет не только уменьшить время проектирования, но и повысить качество выполнения проектных работ. Считаем возможным и целесообразным применение данной программы другими проектными организациями и прочими заинтересованными лицами. **ИТ**

## Список литературы

1. Дмитриев М. В., Евдокунин Г. А. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ // Новости электротехники. — 2007. — № 2 (44). — С. 80–85.
2. Дмитриев М. В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. — СПб.: НИВА, 2008. — 104 с.
3. Программа для расчета кабелей из сшитого полиэтилена (Calc-C): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613320 / А. А. Косяков, И. П. Неугодинов, А. Н. Чернов. — Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 02.04.13.