

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА СЕЧЕНИЯ ЖИЛ И ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ 6-500 КВ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Реферат

В статье описаны физические процессы, происходящие в силовых кабелях 6-500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, принцип выполнения расчётов кабелей, предложен метод автоматизации расчётов и его программная реализация, результаты промышленной эксплуатации прикладного программного обеспечения.

ВВЕДЕНИЕ

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 трёхфазная передача электроэнергии обеспечивается укладкой трёх отдельных кабелей. Для обеспечения требований электробезопасности и механической прочности кабелей применяют металлические экраны или броню. Наличие в кабельной линии электропередачи трёх 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 изложенным, крупнейшим собственником магистральных электрических сетей Российской Федерации ПАО "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 расчёта 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 расчётах "вручную" занимают до двух недель рабочего времени ведущего инженера-проектировщика на каждую КЛ, поскольку данные расчёты являются итеративными, скорость их выполнения в значительной мере зависит от опыта и квалификации инженера-проектировщика. Необходимость выполнения расчётов в соответствии с упомянутыми СТО ПАО "ФСК ЕЭС" встречается не только для КЛ, являющихся достаточно редким объектом проектирования в связи с высокой стоимостью строительства, но и для также заходов КЛ на подстанции (ПС), кабельных вставок различного назначения на ПС, встречающихся практически на любой ПС 110 кВ и выше.

Востребованность, распространённость в проектировании, итеративность и трудоёмкость расчётов привели авторов к пониманию необходимости автоматизации расчётов.

1. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ПРОГРАММЫ CALC-C

Анализ программного обеспечения по расчёту кабелей с изоляцией из СПЭ показал, что существующее программное обеспечение по выполнению расчётов кабелей с изоляцией из СПЭ имеется на заводах-изготовителях кабельной продукции, но оно "привязано" к конкретной кабельной продукции завода и не выполняет требований стандартов ПАО "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 расчётов, что не устраивало заказчика проектной продукции – ПАО "ФСК ЕЭС";
- замечаний экспертизы 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 формирования рекомендаций по выбору способа заземления экрана. Программа имеет следующие функциональные возможности:

- расчёт сечений жилы и экрана кабеля по токам короткого замыкания (КЗ);
- расчёт сечений жилы и экрана кабеля по длительно допустимым токам;
- расчёт коэффициента использования жилы по току при заземлении экрана кабеля с двух сторон;
- расчёт напряжения на экране кабеля при заземлении экрана кабеля с одной стороны;
- выбор способа заземления экрана кабеля;
- формирование отчёта.

Первая версия программы была выполнена в конце 2011 года. В течение 2012 года проводилась опытная эксплуатация программы на пяти электросетевых объектах ПАО "ФСК ЕЭС", двух объектах ОАО "Сургутнефтегаз" и двух объектах ПАО "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 учётом результатов расчётов 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 расчётных не выявлено.

Всего на разработку программы в течение 2011-2013 годов было потрачено 650 тыс. руб. При использовании программы в 2012-2016 годах достигнут экономический эффект в размере 864 тыс. руб. за счёт сокращения времени выполнения расчётов ведущим инженером-проектировщиком с двух недель без использования программы Calc-C до одного рабочего дня с использованием программы (расчёт времени – по одному электросетевому объекту).

2. ВЫБОР СПОСОБОВ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ

В соответствии со стандартами ОАО "ФСК ЕЭС", программа Calc-C рассчитывает и предлагает инженеру-проектировщику на выбор один из трёх 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 повторение одного и того же способа заземления (рис. 1 и 2).

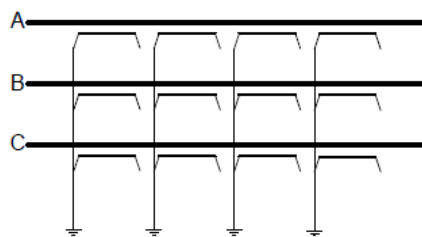


Рис. 1. Разделение экранов кабелей на $K=4$ отдельных секции, каждая из которых заземлена с одной стороны

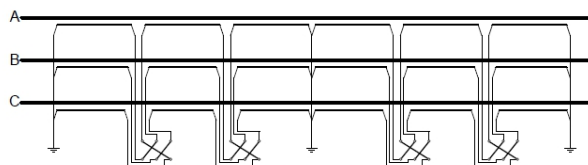


Рис. 2. Заземление экранов кабелей с двойным полным циклом транспозиции и заземлением средней точки

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 потерь 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:

$$\frac{I_{доп}}{I_{доп.ид}} = K_{И}$$

где $K_{И}$ – коэффициент использования, характеризующий степень использования пропускной способности однофазного кабеля, равный

$$K_{И} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{P_{э}}{P_{ж}}}}$$

где $P_{э}$ – потери в экране кабеля;
 $P_{ж}$ – потери в жиле кабеля.

При заземлении экрана с двух сторон длительно допустимый ток в жиле кабеля при наличии потерь в экране $I_{доп}$ должен быть меньше максимального рабочего тока, а коэффициент использования пропускной способности кабеля $K_{И}$ близок к величине 0,9...1, 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. 1). 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 трёхфазного КЗ) наибольшее напряжение на экране кабеля относительно земли определяют по формуле (таблица А.2 СТО 56947007-29.060.20.103-2011)

$$U_{\Sigma} = \frac{|Z_{ЖЭ} - Z_K| \cdot I_{Ж} \cdot L_K}{K}$$

где Z_k – взаимное продольное погонное сопротивление между жилами фаз кабеля;

$Z_{ЖЭ}$ – взаимное продольное погонное сопротивление между жилой и экраном кабеля;

$I_{Ж}$ – расчётное значение тока в жиле кабеля;

L_K – длина кабельной линии;

K – число отдельных секций экранов кабелей, каждая из которых заземлена с одной стороны.

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)

$$U_{\Sigma} = \frac{Z_{ЖЭ} \cdot I_{Ж} \cdot L_K}{K}$$

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. 1).

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 формуле (таблица А.2 СТО 56947007-29.060.20.103-2011)

$$U_{\Sigma} = \frac{|Z_{ЖЭ} - Z_K| \cdot I_{Ж} \cdot L_K}{3N}$$

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

$$U_{\Sigma} = \frac{2 \cdot |Z_{ЖЭ} - Z_K| \cdot I_{Ж} \cdot L_K}{9N}$$

где N – число циклов транспозиции.

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. 2).

Программа для расчета кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена Calc-C производит расчет выше приведенных величин и даёт рекомендации о применимости каждого способа заземления экрана кабеля, однако решение о применении того или иного способа заземления экранов кабелей с изоляцией из СПЭ остаётся за инженером-проектировщиком.

3. ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММЫ CALC-C

На рис. 3 приведён интерфейс программы Calc-C [3]. Главное окно программы содержит поля для ввода исходных данных. После запуска приложения эти поля содержат некоторые начальные значения, при необходимости пользователь их изменяет.

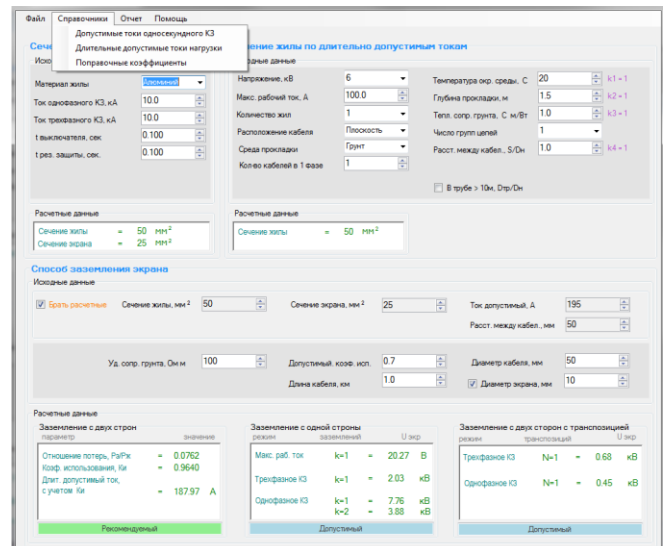


Рис. 3. Интерфейс программы Calc-C

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

После завершения ввода значения с клавиатуры, для отображения результатов расчётов, необходимо нажать "Enter" на клавиатуре. Также данные можно загрузить из ранее сохранённого файла. В справочниках (рис. 4) содержатся исходные данные по допустимым токам и поправочным коэффициентам в соответствии со стандартами ПАО "ФСК ЕЭС", используемыми программой для расчётов.

Сечение, мм²	И жилы при прокладке кабеля в земле, А				И жилы при прокладке кабеля на воздухе, А			
	медь	алюминий	медь	алюминий	медь	алюминий	медь	алюминий
50	250	225	195	170	250	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	855	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. 4. Длительно допустимые токи нагрузки в меню "Справочники"

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 расчётных данных (рис. 5).

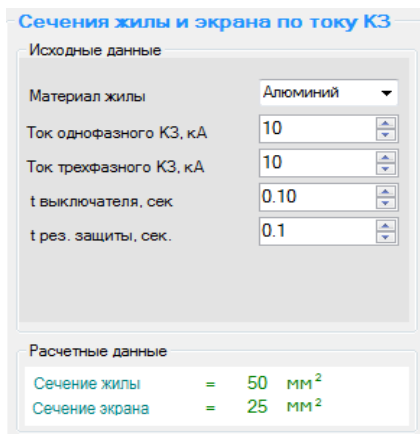


Рис. 5. Интерфейс поля для расчета сечения жилы и экрана кабеля по токам КЗ

Интерфейс поля для расчёта сечения жилы кабеля по длительно допустимым токам приведён на рис. 6. Справа отображаются вычисленные поправочные коэффициенты для условий прокладки.

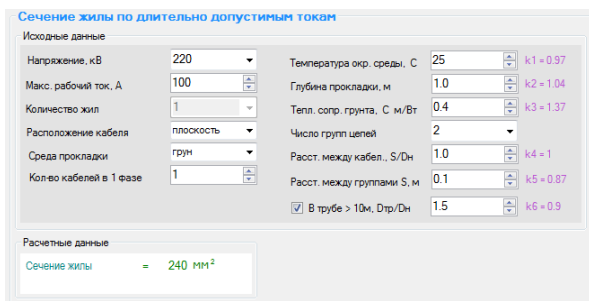


Рис. 6. Интерфейс поля для расчёта сечения жилы кабеля по длительно допустимым токам

Третьим этапом расчёта кабеля является выбор способа заземления экрана, который проводится с помощью интерфейса поля (рис. 7).

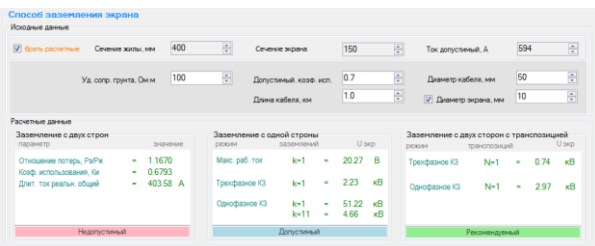


Рис. 7. Интерфейс поля для выбора способа заземления экрана кабеля

ВЫВОД

В настоящее время программа Calc-C успешно применяется в ОАО "Инженерный центр энергетики Урала" для автоматизации расчётов КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена при проектировании электросетевых объектов, что позволяет не только уменьшить время проектирования, но и повысить качество выполнения проектных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. *Однофазные силовые кабели 6-500 кВ*. Новости Электротехники 2007, nr 2(44).
2. Дмитриев М.В. *Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ*. НИВА, Санкт-Петербург 2008.
3. Косяков А.А., Неугодников И.П., Чернов А.Н. *Программа для расчета кабелей из сшитого полиэтилена (Calc-C)*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013613320, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.04.13.

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA KABLI 6-500 KV O IZOLACJI Z POLIETYLENU USIECIOWANEGO

Streszczenie

Artykuł przedstawia procesy fizyczne w kablach 6-500 kV o izolacji z polietylenu usieciowanego, zasady automatyzacji obliczeń, metody ich realizacji w oprogramowaniu, wyniki eksploatacji oprogramowania w biurze projektowym.

Autory:

dr inż. **Iwan Neugodnikow** – Uralski Państwowy Uniwersytet Transportu Kolejowego, Jekaterynburg, Rosja
 dr inż. **Aleksiej Kosjakow** – Uralski Państwowy Uniwersytet Transportu Kolejowego, "Inżynierny Centrum Energetyki Uralu" SA, Jekaterynburg, Rosja