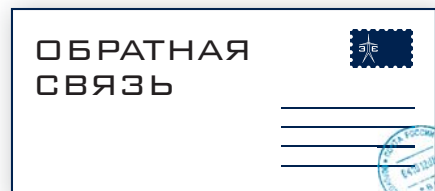


Заземление экранов кабелей в сетях 20 кВ

В нашей стране есть простые методики выбора оптимальных схем заземления экранов однофазных кабелей, достоверность которых была многократно проверена в действующих электрических сетях 6–500 кВ и уже давно не вызывает сомнения. В этой связи не хотелось оставить без внимания два доклада из материалов II Всероссийской конференции «Технико-экономические аспекты развития электрических сетей 20 кВ» (Москва, июль 12.07.2016), которые были опубликованы в № 5(38) журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ: передача и распределение» за 2016 год.



ВВЕДЕНИЕ

Материалы упомянутых статей [1, 2] посвящены, в основном, разным схемам заземления экранов кабелей в сетях класса 20 кВ, развитие которых для московского региона является весьма актуальной задачей. Обсуждение этих материалов требуется потому, что они противоречат друг другу. Так, в [1] указывается на допустимость простого двустороннего заземления экранов для всех кабельных линий 20 кВ, а в [2] — читателей склоняют скорее к выполнению одностороннего заземления экранов.

Опираясь на расчеты для кабеля 500/16 мм², в [1] утверждают, что проблемы с токами и потерями в экранах кабельных линий 20 кВ являются надуманными, и что вполне допустимо повсеместно выполнять самое простое двустороннее заземление экранов. С этим сложно согласиться, так как:

- сечение экранов 16 мм² кабельными заводами для жил 500 мм² не выпускается;
- реальные расстояния между фазами линии больше, чем отвечающие прокладке сомкнутым треугольником, например потому, что все чаще кабели размещаются пофазно в полимерных трубах диаметром от 110 до 225 мм каждая.

В [2] внимание уделено уже не только потерям в экранах, но и ряду других важных вопросов, среди которых вынос потенциала и электробезопасность. Выво-

ды статьи говорят о том, что для каждого из объектов необходимо проводить расчеты и обосновывать оптимальное техническое решение, но в целом предпочтение следует отдавать одностороннему заземлению экранов. Данные соображения можно только поддерживать, хотя число рассмотренных авторами [2] схем соединения и заземления, избыточно, ведь большинство из них, очевидно, так никогда и не будут реализованы в силу сложностей с организацией эксплуатации. В частности, речь идет о схемах:

- с периодическим неразборным объединением экранов друг с другом;
- с резисторами, включенными между экранами и землей.

Неразборное объединение экранов в соединительных муфтах действительно какое-то время применялось в московской кабельной сети, так как считалось, что за счет параллельного включения экранов повышается их стойкость токам короткого замыкания. Однако затем от решения отказались, поскольку у таких линий очень сложно организовать поиск мест повреждений. Также в книге [3] было показано, что объединение экранов, вопреки ожиданиям, на самом деле особо и не изменяет термической стойкости экранов.

Если говорить об установке резисторов на одном из концов экрана, то данное решение является «промежуточным» ва-

риантом между двусторонним заземлением (сопротивление резистора равно 0) и односторонним заземлением (сопротивление — бесконечность). Подбирая номинал сопротивления резистора, можно найти лучшее сочетание величины потерь в экранах и напряжения на экранах относительно земли. Данное техническое решение в мире не применяется, чему есть ряд веских причин. Во-первых, в нормальном режиме работы в резисторах проходит ток промышленной частоты, имеются потери мощности, их надо оплачивать, а выделяющееся тепло — отводить в окружающее пространство. Во-вторых, при любом коротком замыкании кабельной линии в резисторах выделится значительная энергия, они «раскалятся», а после отключения линии будут долго остывать, явно мешая персоналу оперативно их отсоединить и приступить к поиску места повреждения. В-третьих, подходящие по параметрам резисторы габаритны, что в сочетании с их постоянным нагревом вызывает сложности с размещением в распределительных устройствах.

Рассмотрим подробнее вопросы заземления экранов кабельных линий 20 кВ, выбирая между двумя самыми простыми техническими решениями — двусторонним и односторонним заземлением экранов. Выбор оптимальной схемы, как говорилось в [3, 4], принципиально зависит от двух факторов:

- сечение экранов;
- расстояние между фазами.

ВЫБОР СЕЧЕНИЯ ЭКРАНОВ

Сечение экранов должно обеспечить отсутствие опасного перегрева изоляции при прохождении по ним токов короткого замыкания (рисунок 1). Для сетей с большими токами короткого замыкания и/или временем отключения приходится применять кабели с большими сечениями экранов. Однако в нормальном режиме работы такие экраны, напротив, нежелательны, поскольку их двустороннее заземление приведет к возникновению значительных наведенных токов промышленной частоты и потерь. Иными словами, короткие замыкания и нормальным режим предъявляют различные требования: при авариях лучше иметь кабель с большим сечением, а в нормальном режиме — с малым сечением, что позволит выполнить его простое заземление с двух сторон и при этом не волноваться на счет паразитных наводок и их последствий.

В [3] показано, что из всех сетей среднего напряжения лишь те, где в нейтрали установлен «низкоомный» резистор, позволяют иметь кабели с малыми сечениями экранов и при этом не бояться их перегрева токами короткого замыкания. Поэтому как раз для сетей с резистивно заземленной нейтралью, к которым и относится 20 кВ в Москве, возникает желание разрешить двустороннее заземление экранов, ведь оно вроде бы не должно сопровождаться опасными наведенными токами и потерями.

К сожалению, не все столь просто. Дело в том, что, хотя сети с резистивным заземлением нейтрали

формально и позволяют иметь кабели даже с экранами всего 16 мм², о которых говорится в [1], но заводы готовы производить никак не меньше 35 мм². Также прокладка фаз сомкнутым треугольником, упомянутая в [1], вряд ли возможна на практике, ведь все больше линий получают участки в трубах.

МИНИМАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ ЭКРАНОВ

На предприятиях существует минимальное сечение одной проволоки экрана, и для достижения 16 мм² требуется лишь несколько таких единичных проволок. Но несколько упомянутых проволок никак не смогут равномерно и плотно закрыть поверхность изоляции, обеспечив в ней однородное электрическое поле. Иначе говоря, минимальное технологически возможное сечение экрана оказывается тесно связано с длиной окружности поверх изоляции кабеля, то есть определяется сечением жилы кабеля и классом его номинального напряжения (толщиной изоляции).

На рисунке 2 схематично показан однофазный кабель при разном сечении экранов. Если бы сечение экрана составляло 25 мм², то единичные проволоки (красные) были бы очень удалены друг от друга, что не позволяло бы считать поле внутри изоляции равномерным. Увеличение экрана с 25 до 50 мм² (красные и зеленые проволоки) уже позволяет исправить ситуацию, а 95 мм² (три цвета проволок вместе) — идеально.

В каталогах рост сечений жилы и класса напряжения всегда сопровождается ростом минимального

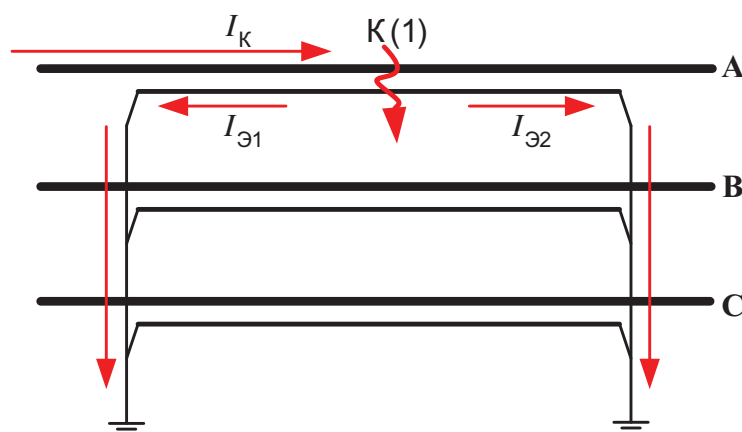


Рис. 1. Схема простого двустороннего заземления экранов

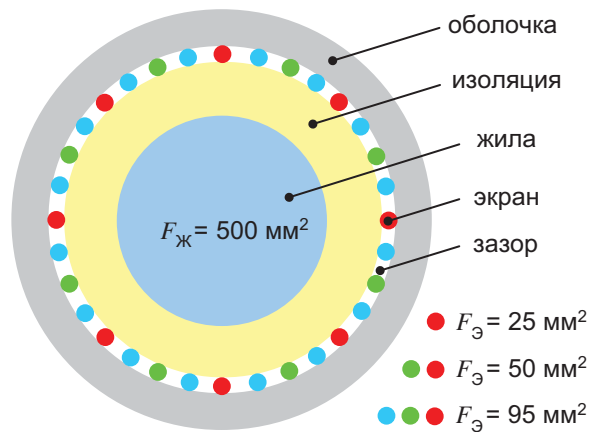


Рис. 2. Конструкция однофазного кабеля

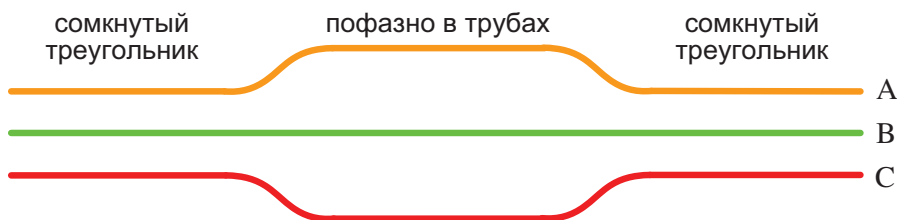


Рис. 3. Пример изменения взаимного расположения фаз по трассе линии

из производимых экранов. В частности, распространенные в сети 20 кВ кабели 500 мм² не выпускаются с экранами менее 35 мм².

Итак, к сожалению, о сечении экранов 16 мм² для жилы 500 мм² речи быть не может, даже если такое сечение экранов достаточно, чтобы выдержать однофазное повреждение изоляции и сопровождающий его ток промышленной частоты (рисунок 1), проходящий по экранам и нагревающий их за время работы защиты на отключение.

Сечение экранов (16, 25, 35, 50, 70, 95, 120 мм²) существенно влияет на токи и потери в экранах при их двустороннем заземлении. Поэтому выводы, сделанные в [1] для 16 мм², не могут относиться к другим «реальным» сечениям. Это объясняет, почему авторы [2], опиравшиеся на 35 мм² и более, в качестве оптимальной схемы назвали уже не двустороннее, как в [1], а скорее одностороннее заземление.

РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ФАЗАМИ

В вопросах заземления экранов однофазных кабелей самую принципиальную роль играет среднее по трассе расстояние между фазами. Наименьших наведенных токов и напряжений удастся достичь при прокладке фаз вплотную друг другу в виде сомкнутого треугольника.

С годами подходы к строительству кабельных линий постепенно меняются, и сейчас уже сложно найти линию, где не было бы участков, проложенных в трубах. Чаще всего фазы кабеля прокладываются не в общей трубе, а каждая в отдельной. Это приводит к увеличению расстояния между фазами кабеля на трубных участках, а значит – и к росту среднего расстояния вдоль трассы. На рисунке 3 в качестве при-

мера показана трасса, где в средней части фазы лежат в трубах.

Однофазный кабель класса напряжения 20 кВ сечением жилы 500 мм² имеет внешний диаметр около 50 мм и может быть помещен в трубу диаметром 110 мм:

- при прокладке всей трассы без труб, просто в грунте сомкнутым треугольником, расстояние между осями фаз равно диаметру кабеля 50 мм;
- при прокладке всей трассы в трубах, расположенных вплотную друг к другу треугольником, расстояние между осями фаз равно диаметру трубы 110 мм;
- если в трубах, например, только половина трассы, то среднее

расстояние вдоль трассы составит 80 мм.

Как видно, среднее межфазное расстояние зависит от доли длины трассы, где фазы проложены в трубах, а также от диаметра этих труб и их расположения друг относительно друга. Дадим пример расчета.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ДЛЯ КАБЕЛЯ 20 КВ

На рисунке 4 приведены результаты расчета соотношения потерь в экране и в жиле для кабельной линии 20 кВ, выполненной однофазными кабелями 500 мм². Экраны имеют двустороннее заземление, а их сечение варьируется в диапазоне до 120 мм². Материал жилы — это или медь, или алюминий. Длина кабельной линии не указана, поскольку она не влияет на $P_{\text{Э}}/P_{\text{Ж}}$.

В расчетах рассматривались три варианта трассы линии:

- вся трасса сомкнутым треугольником без труб;

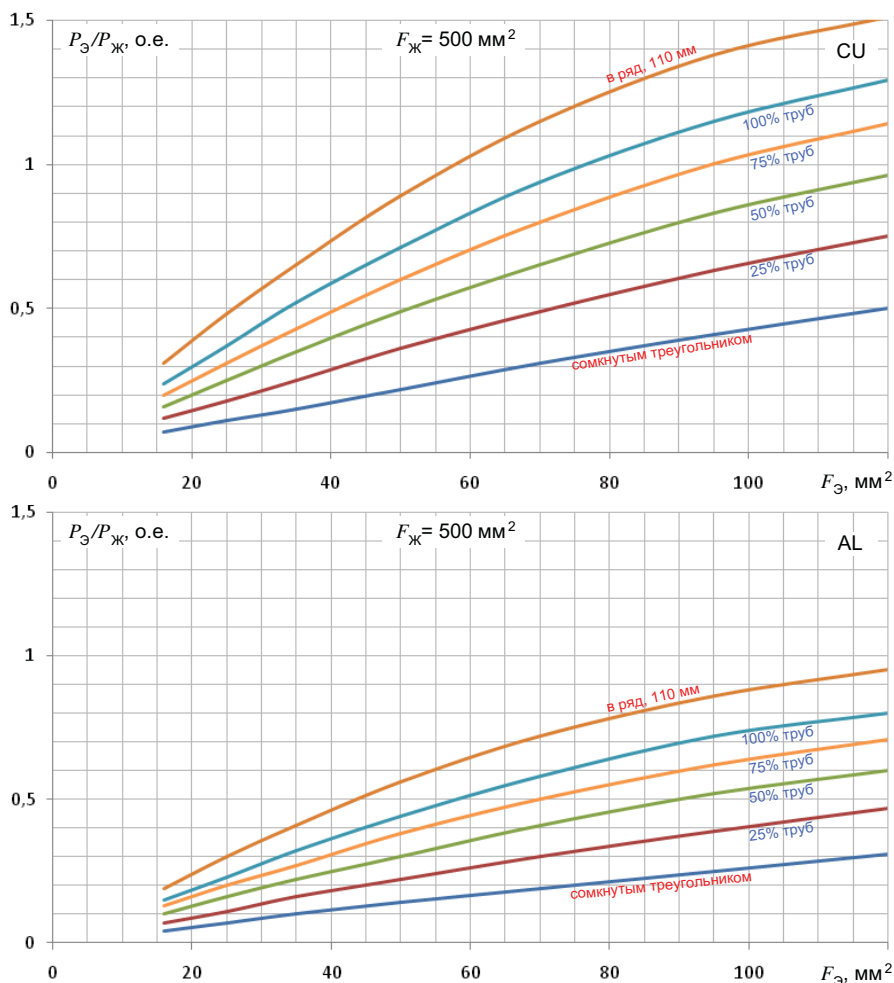


Рис. 4. Относительные потери в двусторонне заземленных экранах кабеля 20 кВ с медной (CU) или алюминиевой (AL) жилой сечением 500 мм² в зависимости от взаимного расположения фаз

- тот или иной процент трассы в трубах диаметром 110 мм, расположенных в виде треугольника вплотную друг к другу (например, «25% труб» означает, что 25% трассы уложены в трубах, а 75% — в грунте сомкнутым треугольником);
- вся трасса проложена в ряд с расстоянием между осями фаз 110 мм (это может быть или прокладка в открытом грунте с указанным расстоянием, или прокладка в трубах 110 мм, которые уложены в ряд вплотную друг к другу).

При двустороннем заземлении экранов отношение $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} > 0$ показывает роль потерь в экране на фоне потерь в жиле и позволяет оценить целесообразность отказа от двустороннего заземления в пользу одностороннего или транспозиции экранов (для обоих этих вариантов справедливо $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} = 0$).

Из рисунка 4 видно, что для проложенных треугольником кабелей с экранами до 35 мм² справедливо $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} \leq 0,2$, то есть потери в экранах составляют не более 20% от потерь в жилах. Если же часть трассы линии фазы размещена в трубах, то потери возрастают до $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} \leq 0,5$. Для сечений экрана сверх 35 мм² цифры еще хуже.

Помимо относительных потерь в экранах $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$ существует еще один важный показатель — это коэффициент использования пропускной способности кабеля

$$K_{\text{и}} = \frac{1}{\sqrt{1 + P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}}},$$

который показывает, на сколько именно можно загружать жилу

током относительно предельного значения, еще не опасаясь перегрева изоляции сверх допустимой для нее температуры:

- при $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} = 0,5$ имеем $K_{\text{и}} \approx 0,80$;
- при $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} = 0,2$ имеем $K_{\text{и}} \approx 0,90$;
- при $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} = 0$ имеем $K_{\text{и}} = 1$.

Данные цифры означают, что купленный кабель можно использовать не более чем на 80% или 90% от его каталожной пропускной способности, указанной там без учета наличия в экранах паразитных токов и потерь мощности. Утрата 20% или 10% пропускной способности дорогостоящего кабеля вряд ли кого-то обрадует, и по этой причине для многих линий 20 кВ целесообразны мероприятия по борьбе с токами и потерями в экранах (при них $K_{\text{и}} = 1$) — одностороннее заземление или транспозиция.


Для принятия решения об оптимальной схеме заземления, помимо никак не зависящих от длины линии величин $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$ и $K_{\text{и}}$, надо оценить годовую стоимость потерь мощности в экранах $C_{1\text{год}}$, которая уже прямо пропорциональна этой длине. Например, в работе [4] показано, что ежегодная стоимость потерь в экранах трех фаз линии длиной 6 км, имеющей $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} \approx 0,4$, достигала нескольких сотен тысяч рублей, а за срок службы ущерб от потерь в экранах составил бы многие миллионы рублей.

Итак, предложение авторов [1] разрешить повсеместно в сетях 20 кВ простое двустороннее заземление экранов является не вполне корректным, поскольку такая идея опирается на величину $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$, полученную только для малого сечения экрана и малого расстояния между фазами, без

какого-то анализа годовой стоимости потерь мощности в экранах $C_{1\text{год}}$, зависящей от протяженности линии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

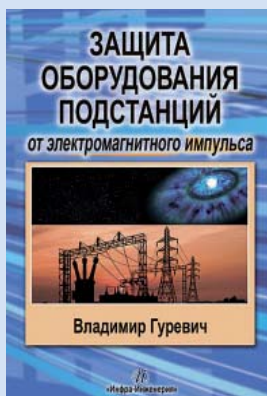
Рассуждения показали, что в сетях 20 кВ, даже если они имеют резистивную нейтраль и малое сечение экранов, выбор оптимальной схемы заземления экранов остается актуальной проблемой, при решении которой необходимо учитывать такие факторы, как среднее вдоль линии расстояние между фазами и длина трассы.

Расчет токов, напряжений, потерь мощности в экранах однофазных кабелей 6–500 кВ был и остается важным разделом проектной документации. 

*Дмитриев М.В., к.т.н.,
научный редактор журнала
«ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача
и распределение»*

ЛИТЕРАТУРА

1. Майоров А.В., Шунтов А.В. О потерях мощности в экранах кабелей 20 кВ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2016, № 5(38). С. 82–84.
2. Антонов А.А., Гусев Ю.П. и др. Способы заземления экранов кабелей // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2016, № 5(38). С. 86–91.
3. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2010. 152 с.
4. Дмитриев М.В. Выбор и реализация схем заземления экранов однофазных кабелей 6–500 кВ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2013, № 6(21). С. 90–97.



Внимание специалистов! Выходит из печати книга Гуревича В.И. ЗАЩИТА ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИЙ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА

В книге рассмотрены практические аспекты защиты электрооборудования подстанций на примере микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) и силовых трансформаторов от разрушительного воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва и других видов преднамеренных электромагнитных деструктивных воздействий, оборудование для производства которых интенсивно разрабатывается и совершенствуется в последние годы. Предложены различные технические решения и организационные мероприятия, направленные на повышение живучести подстанций. Книга рассчитана на специалистов, занимающихся эксплуатацией электрооборудования на подстанциях, проектировщиков, производителей МУРЗ, руководителей отрасли, а также может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам вузов, специализирующихся в области электроэнергетики.

Стоимость издания — 920 руб. Заказать книгу можно в издательстве Инфра-Инженерия:
<http://www.infra-e.ru/products/protectsubstequip>, e-mail: infra-e@yandex.ru, skype: [infra_e](https://www.skype.com/name/infra_e)