

# ОДНОФАЗНЫЕ И ТРЕХФАЗНЫЕ КАБЕЛИ 6–35 кВ: РАЗЛИЧИЯ ПРИ ВЫБОРЕ СЕЧЕНИЯ ЭКРАНОВ И СХЕМЫ ИХ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

ДМИТРИЕВ М.В., к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета

В настоящее время сети 6–35 кВ можно строить с применением трех основных типов кабелей: однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ); трехфазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена; трехфазные кабели с бумажно-масляной изоляцией (БМИ). Как правило, кабели БМИ дешевле СПЭ. Также в отличие от СПЭ их можно обслуживать уже имеющимися в сетях лабораториями, использующими постоянное испытательное напряжение и «прожиговые» методы поиска повреждений. Вместе с тем, по ряду причин техническая политика крупных сетевых компаний направлена на использование исключительно СПЭ. Рассмотрим особенности таких кабелей в зависимости от их конструкции, которая бывает или однофазной, или трехфазной.

Преимущества однофазных кабелей 6–35 кВ СПЭ над трехфазными известны:

- отсутствие ограничений на сечение жилы (у трехфазного оно не более  $3 \times 240 \text{ мм}^2$  и только по специальному заказу – до  $3 \times 400 \text{ мм}^2$ );
- большая строительная длина и лучшая гибкость;
- простая конструкция, а значит высокая надежность;
- удобные монтажные и ремонтные работы.

Недостатки однофазных кабелей 6–35 кВ СПЭ упоминаются заметно реже:

- необходимость выбора сечения экрана на большие токи короткого замыкания;
- необходимость отказа от простого и удобного двустороннего заземления экранов из-за наличия в них паразитных токов и потерь активной мощности (переход к одностороннему заземлению экранов или транспозиции экранов [1]);
- сложность выявления поврежденного фидера в сетях 6–35 кВ с традици-

онной для нашей страны изолированной (компенсированной) нейтралью;

- эффективность использования не для всех сетей 6–35 кВ, а, главным образом, для сетей с резистивным заземлением нейтрали, где однофазное замыкание на землю быстро и селективно отключается действием защит.

Поясним указанные недостатки однофазных кабелей.

## ОДНОФАЗНЫЕ КАБЕЛИ

Особенность однофазного кабеля, имеющего заземленный медный экран – отсутствие за его пределами электрического поля, но наличие маг-

нитного. Магнитные поля трех однофазных кабелей, входящих в трехфазную группу, в нормальном режиме дают наводки на контуры, образованные тремя экранами.

При двустороннем заземлении экранов эти контуры получаются замкнутыми, и наведенное напряжение вызывает появление в экранах кабеля продольных токов промышленной частоты, приводящих к нагреву экранов одновременно по всей длине линии, повышающих температуру изоляции и снижающих допустимый ток кабеля. Для минимизации токов и потерь в экранах согласно [1] следует:

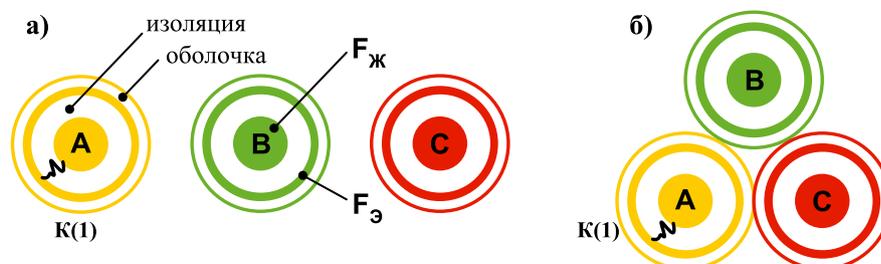


Рис. 1. Трехфазная группа однофазных кабелей 6–500 кВ: (а) прокладка в ряд; (б) прокладка сомкнутым треугольником

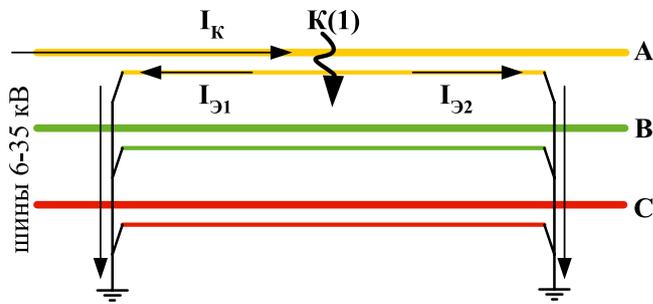


Рис. 2. Токи в заземленных по концам экранах однофазных кабелей при  $K(1)$

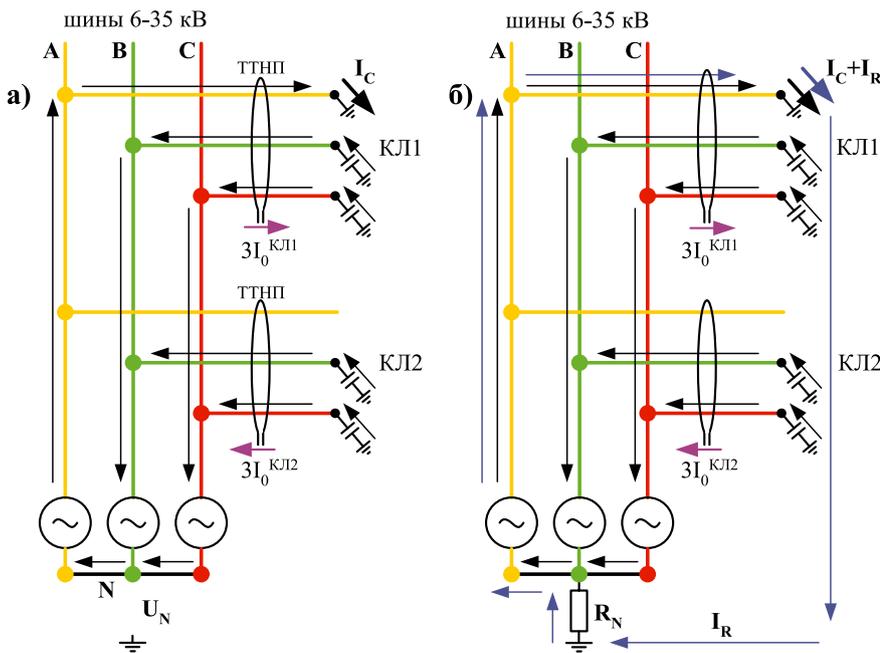


Рис. 3. Однофазное замыкание на землю в сети 6–35 кВ: (а) изолированная нейтраль; (б) заземленная через резистор

- прокладывать кабели сомкнутым треугольником (снижается площадь контуров и поэтому уменьшается наводка), рис. 1,б;
- применять кабели с малым сечением экрана  $F_{\text{Э}}$  (растет сопротивление контуров, что обуславливает снижение их тока и потерь).

Как видно, выбор сечения экрана принципиален в вопросах потерь активной мощности в кабеле в нормальном режиме, а значит – напрямую определяет эффективность однофазных кабелей в электрических сетях. Использовать кабели с малым  $F_{\text{Э}}$ , к сожалению, получается редко, и виной тому необходимость избежать перегрева экрана током короткого замыкания, который в случае повреждения главной изоляции кабеля попадает в экран и проходит по нему до мест заземления (рис. 2). Таким образом, вы-

бор сечения  $F_{\text{Э}}$  является непростой задачей, поскольку:

- в нормальном режиме работы желательнее иметь малое  $F_{\text{Э}}$ ;
- при коротких замыканиях желательнее иметь большое  $F_{\text{Э}}$ .

Однофазное повреждение  $K(1)$  наиболее распространено в сетях, и поэтому основное внимание уделим именно ему. При однофазном повреждении изоляции ток из жилы аварийной фазы попадает в ее экран и далее по экрану в его заземляющие устройства. Если релейная защита оперативно (не более нескольких секунд) отключит кабель от сети, то, согласно опыту эксплуатации, практически вне зависимости от конкретной величины тока  $K(1)$ , повреждение не успеет оказать какого-либо значимого теплового воздействия на две соседние фазы (рис. 1). Это наблюдение отно-

сится не только к случаям прокладки трех однофазных кабелей на удалении друг от друга (рис. 1,а), но и к прокладке фаз вплотную сомкнутым треугольником (рис. 1,б).

Одно из существенных преимуществ однофазных кабелей заключается в том, что их монтаж и ремонт можно осуществлять пофазно. Преимуществом также было бы, если бы и повреждение одной из фаз никогда не вредило бы двум другим, рядом расположенным. Следовательно, можно утверждать, что эффективно использовать однофазные кабели удастся в основном в тех сетях, где однофазные повреждения  $K(1)$  автоматически отключаются с минимальными выдержками времени и по этой причине не дают возможности для развития аварии на соседние фазы и цепи.

В сетях 6–35 кВ вопросы быстрого отключения  $K(1)$  принципиально зависят от используемого способа заземления нейтрали. Некоторые из них приведены на рис. 3. Рассмотрим повреждение изоляции однофазного кабеля в сети 6–35 кВ:

- с изолированной (компенсированной) нейтралью;
- с нейтралью, заземленной через резистор.

### Нейтраль изолирована

На рис. 3,а показаны сборные шины сети 6–35 кВ с изолированной нейтралью и, в качестве примера, две отходящие кабельные линии КЛ1 и КЛ2. При однофазном замыкании на землю фазы «А» на КЛ1 ток однофазного повреждения  $I_C$ , попав из жилы в экран (в землю), не может замыкаться через нейтраль сети (поскольку она изолирована) и вынужден проходить через емкости фаз «В» и «С» линий КЛ1 и КЛ2. Поэтому  $I_C$  носит емкостный характер, его величина определяется номинальным напряжением сети  $U_{\text{НОМ}}$  и ее суммарной емкостью  $C_{\text{СУМ}}$  на землю:

$$I_C = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot C_{\text{СУМ}}$$

Емкостные токи (единицы-десятки Ампер) накладываются на рабочие токи нагрузки кабельных линий (десятки-сотни Ампер). Также важно, что и те, и другие токи есть и в аварийной КЛ1, и в неповрежденной КЛ2 (КЛ3, КЛ4, КЛ5...). Как следствие – защиты,

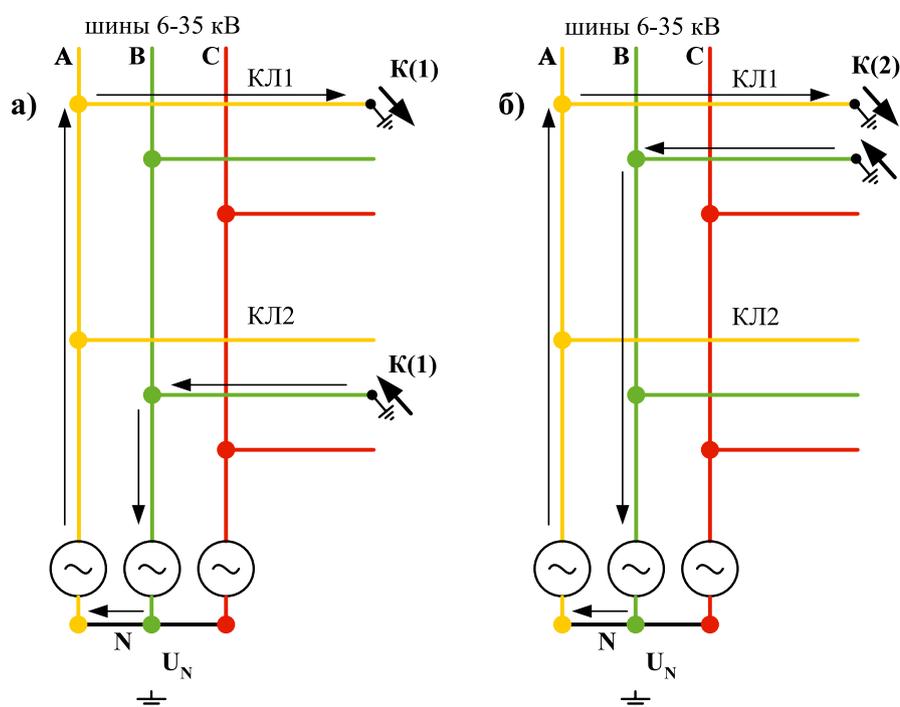


Рис. 4. Развитие однофазного замыкания на землю в сети 6–35 кВ с изолированной нейтралью: (а) повреждение на разных КЛ; (б) повреждение на одной КЛ

построенные на измерении фазных токов кабелей, не способны селективно определить, где именно в сети произошло замыкание на землю.

Процесс автоматизации поиска повреждений ряд фирм предлагает строить не на фазных токах, а на токах нулевой последовательности, для измерения которых каждую КЛ следует снабдить трансформатором тока нулевой последовательности (ТТНП). Такой трансформатор дает представление о сумме векторов фазных токов  $3I_0 = I_A + I_B + I_C$ . Согласно рис. 3, а токи  $3I_0^{КЛ1}$  и  $3I_0^{КЛ2}$  имеют противоположные знаки, и несложно показать: в неповрежденных линиях (КЛ2, КЛ3, КЛ4...) ток нулевой последовательности всегда направлен к шинам, и только в аварийной – от шин.

Сравнение знаков токов нулевой последовательности действительно позволяет выявить участок сети с  $K(1)$ , однако при одном условии – повреждение не является дуговым, а носит устойчивый характер. Поскольку многие повреждения происходят через дугу, то токи нулевой последовательности перестают быть синусоидальными токами промышленной частоты, и сравнение их знаков затруднено. По этой причине в сетях с изолированной

нейтралью (компенсированной) нейтралью, несмотря на значительные усилия многих ученых, автоматизация поиска  $K(1)$  пока еще не достигнута.

При замыкании на землю напряжение аварийной фазы снижается практически до нуля, а напряжение на двух других – повышается с нормальных фазных до линейных. Увеличенное напряжение фаз «В» и «С» происходит сразу по всей сети и может вызвать пробой изоляции в каком-то ослабленном месте на каком-то другом участке сети (скажем, в старой кабельной линии с БМИ изоляцией). Пример такого развития аварии показан на рис. 4, а, где спустя некоторое время к  $K(1)$  фазы «А» КЛ1 добавилось  $K(1)$  фазы «В» КЛ2, и повреждение из простого однофазного превратилось в два однофазных, т.е. стало двойным замыканием на землю  $K(1,1)$ .

Возможно, что сценарий развития аварии будет таким как на рис. 4, б. Он более вероятен для тех сетей 6–35 кВ, где однофазные кабели прокладываются сомкнутым треугольником. При возникновении  $K(1)$  на фазе «А» КЛ1 в силу близости фаз «В» и «С» за счет термического воздействия дуги перегревается изоляция, например, фазы «В», после чего повреждение из

простого однофазного превращается в междуфазное короткое замыкание. Однако, даже если фазы проложены треугольником, всегда есть места, где они расходятся – например, это участки вблизи от концевых или же соединительных муфт. Поэтому вариант рис. 4, а никак нельзя исключать.

Видно, что в сетях 6–35 кВ с изолированной (компенсированной) нейтралью сценарии развития аварии могут быть разными, однако принцип выбора сечения  $F_0$  неизменен: экран должен выдерживать ток  $K(1,1)$  с учетом времени его протекания.

#### Нейтраль заземлена через резистор

В России сети среднего напряжения 6–35 кВ традиционно выполнялись с изолированной (компенсированной) нейтралью. Такая нейтраль обеспечивала малые токи при  $K(1)$  и позволяла длительно не отключать потребителей, присоединенных на линейные напряжения, также существовала вероятность самоустранения аварии. Указанные свойства сети были весьма полезны в условиях слабого развития электрических сетей, когда потребители зачастую имели всего лишь один источник питания – причем вовсе не кабельную линию, а воздушную, где годовое число повреждений значительно больше, чем в кабельной.

В настоящее время сети 6–35 кВ развиты, особенно в крупных городах, где все потребители получают питание от двухцепных кабельных линий. Поэтому даже при аварии на одной из двух цепей ее можно сразу отключать, а потребитель останется запитан по второй. Продолжать работу кабельной сети с замыканием на землю  $K(1)$  не только не имеет смысла (повреждение само не устранилось), но даже вредно (напряжение на двух неповрежденных фазах сети повышается сверх нормального фазного и может вызвать развитие аварии в местах с ослабленной изоляцией).

Для повышения селективности работы защит от однофазных повреждений в последние годы активно обсуждается возможность перевода сетей 6–35 кВ на иной способ заземления нейтрали – резистивный. Особенно актуален этот вопрос для кабельных сетей, построенных однофазными ка-

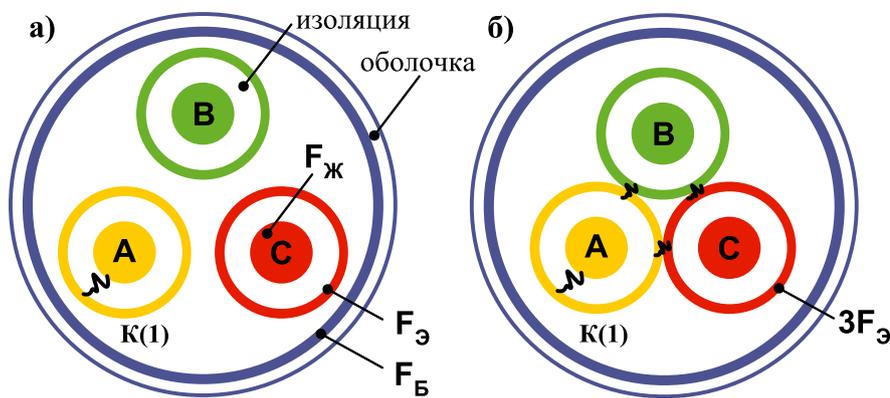


Рис. 5. Трехфазный кабель 6–35 кВ с пофазно экранированными жилами: (а) экраны не касаются друг друга; (б) касаются

белями, где быстрое и безошибочное отключение  $K(1)$  позволит исключить распространение аварии, а значит, снизить величину ущерба, упростить и ускорить ремонтные работы.

Появление резистора в нейтрали дает увеличение тока ТТНП аварийной КЛ на столько, что у защиты не остается сомнений в том, какая именно из КЛ повреждена. Иными словами, в сетях с резистором защита строится не на сравнении знаков токов ТТНП, а уже на величинах этих токов.

На рис. 3,б показано, что наличие резистора приводит к появлению в месте замыкания на землю в дополнение к «традиционной» емкостной составляющей  $I_C$  еще одной – активной  $I_R$ , замыкающейся через резистор в нейтрали. Величина этого тока определяется фазной эдс и сопротивлением резистора  $R$ :

$$I_R = E_A / R = (U_{НОМ} / \sqrt{3}) / R.$$

Особенность активной составляющей – то, что она проходит лишь в аварийной линии, а в неповрежденных отсутствует. Таким образом, удачный выбор  $R$  обеспечит заметное различие величин токов нулевой последовательности  $|3i_0^{KЛ1}| \gg |3i_0^{KЛ2}|$  и уверенное срабатывание защит. Накопленный опыт говорит о том, что достаточно применять резисторы  $R$ , обеспечивающие  $I_R = 500 \div 1000$  А.

В сетях 6–35 кВ с резистором сечение экранов  $F_э$  однофазных кабелей надо выбирать на ток  $\sqrt{I_C^2 + I_R^2}$ , проходящий на времена работы защиты, и для этих целей достаточно минимального  $F_э$  (16, 25, 35 мм<sup>2</sup>).

Рациональное применение однофазных кабелей возможно только в

тех сетях 6–35 кВ, где налажено автоматическое селективное отключение любых однофазных повреждений, т.е. в сетях с резистором в нейтрали. Отказ от резистора влечет:

- риски развития однофазных повреждений в более масштабные аварии;
- необходимость применения кабелей с большим  $F_э$ , способным выдерживать токи многофазных повреждений;
- необходимость борьбы с токами и потерями в экранах в нормальном режиме [1], так как они характерны именно для кабелей с большим  $F_э$ .

### ТРЕХФАЗНЫЕ КАБЕЛИ

Существуют разные конструкции трехфазных кабелей, но в настоящее время чаще встречаются кабели с пофазно экранированными жилами (рис. 5), также у них может быть общий экран или броня сечением  $F_б$ .

Компактная конструкция трехфазных кабелей такова, что при возникновении однофазного повреждения  $K(1)$  оно быстро развивается на другие фазы в этом же месте кабеля, и авария превращается из  $K(1)$  в  $K(2)$ , затем в  $K(3)$ . Следовательно, кабель будет отключен от сети обычной максимальной токовой защитой.

Как видно, в сети 6–35 кВ, построенной трехфазными кабелями, не существует проблемы поиска места замыкания на землю, которая была для однофазных кабелей и вызвала необходимость перехода от изолированной нейтрали к резистору. Сеть с трехфазными кабелями может работать при любом способе заземления нейтрали.

Некоторые вопросы применения трехфазных кабелей, тем не менее,

зависят от нейтрали, и главный из них – это выбор сечения экрана  $F_э$ .

### Нейтраль изолирована

Если первое повреждение  $K(1)$  возникло в трехфазном кабеле, то скорее всего развитие аварии будет в том же месте сети (рис. 4,б), и линия будет автоматически отключена. Положим, теперь, что повреждение  $K(1)$  возникло не в рассматриваемом трехфазном кабеле КЛ1, а где-то в другом месте сети (например, на фазе «В» КЛ2, выполненной однофазными кабелями, рис. 4,а), при этом напряжения 50 Гц фаз «А» и «С» относительно земли во всей сети повысится от нормальных фазных значений до линейных, и в каком-то месте с дефектной изоляцией может возникнуть второе  $K(1)$  – пусть это будет фаза «А» трехфазного кабеля КЛ1. Такая последовательность развития событий заставляет выбирать сечение каждого экрана трехфазного кабеля на следующие токи:

- для кабеля рис. 5,а на весь ток  $K(1,1)$ ;
- для кабеля рис. 5,б на 1/3 тока  $K(1,1)$ , поскольку экраны касаются друг друга и работают параллельно.

### Нейтраль заземлена через резистор

В сети с резистивным заземлением нейтрали при возникновении в трехфазном кабеле повреждения  $K(1)$ , вероятно, что оно будет отключено быстрее, чем перейдет в  $K(2)$  или  $K(3)$ . Поэтому здесь сечение  $F_э$  каждого из трех экранов кабеля вида рис. 5,а следует выбирать на ток  $\sqrt{I_C^2 + I_R^2}$  с учетом времени его прохождения. Если же экраны касаются друг друга (рис. 5,б), то каждый из них достаточно считать только на 1/3 от тока  $\sqrt{I_C^2 + I_R^2}$ .

### ВЫБОР СЕЧЕНИЯ ЭКРАНОВ И СХЕМЫ ИХ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

#### Выбор сечения экранов

Сечение медного экрана  $F_э$  (мм<sup>2</sup>), ток короткого замыкания  $I_K$  (кА), время отключения  $t_K$  (сек) должны удовлетворять известному неравенству:

$$I_K \leq K_э \frac{F_э}{\sqrt{t_K}},$$

где  $K_э$  – коэффициент, который по [2] обычно принимают равным  $0.174 \text{ кА}\sqrt{\text{с}}/\text{мм}^2$ ,  $I_K$  – расчетный ток,

**Таблица 1.** Расчетный ток  $I_K$  для выбора сечения  $F_{\Sigma}$  каждого из трех экранов кабельной линии 6–35 кВ с изоляцией СПЭ

Конструкция кабеля	Нейтраль сети 6–35 кВ	
	Изолированная (компенсированная)	Резистивная с быстрым отключением $K(1)$
	Расчетный ток $I_K$ для выбора $F_{\Sigma}$	
Однофазная, рис. 1	$I_{K(1,1)} = 0.87 \cdot I_{K(3)}$	$I_{K(1)} = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}$
Трехфазная, рис.5,а	$I_{K(1,1)} = 0.87 \cdot I_{K(3)}$	$I_{K(1)} = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}$
Трехфазная с касающимися экранами, рис. 5,б	$I_{K(1,1)} = 0.29 \cdot I_{K(3)}$	$I_{K(1)} = 0.33 \cdot \sqrt{I_C^2 + I_R^2}$

**Таблица 2.** Выбор схемы заземления экранов кабелей 6–35 кВ с изоляцией СПЭ и величина потерь активной мощности в экранах в нормальном режиме работы

Конструкция кабеля	Нейтраль сети 6–35 кВ	
	Изолированная (компенсированная)	Резистивная с быстрым отключением $K(1)$
	Оптимальная схема заземления экранов	
Однофазная, рис. 1	Выбор по методике [1]	Двустороннее (потери есть, но малы, если фазы лежат треугольником)
Трехфазная, рис.5,а	Двустороннее (потери есть)	Двустороннее (потери есть, но малы)
Трехфазная с касающимися экранами, рис. 5,б	Двустороннее (потерь нет)	Двустороннее (потерь нет)

определяемый по таблице 1,  $t_K$  – время, которое согласовывается со специалистами по релейной защите (нельзя просто принять его равным 1 сек).

При составлении таблицы 1, как и в [1], полагалось, что в сети с изолированной (компенсированной) нейтралью ток двойного короткого замыкания  $K(1,1)$  достигает  $\sqrt{3}/2 = 0.87$  тока трехфазного  $K(3)$  на шинах распределительного устройства (берется тот конец линии, где ток  $K(3)$  наибольший). Кроме того, в табл. 1 использованы емкостный ток сети  $I_C$ , а также активный ток резистора  $I_R$ .

Рассмотрим влияние схемы заземления экранов кабелей на выбор сечения  $F_{\Sigma}$ . Для этого обратимся к рис. 2. Величины токов в экранах  $I_{\Sigma 1}$  и  $I_{\Sigma 2}$  зависят от места повреждения линии (в ее начале, в середине или в конце) и от схемы заземления экранов. В случаях, когда экраны заземлены на каждом из концов кабельной линии (это бывает при простом двустороннем заземлении экранов или при их транспозиции), в экране аварийной фазы влево и вправо от места повреждения проходят токи  $I_{\Sigma 1}$  и  $I_{\Sigma 2}$  (вместе они составляют ток короткого замыкания  $I_K$ , рис. 2). Расчеты показывают, что даже если авария произошла ровно посередине кабельной линии, то  $I_{\Sigma 1} > I_{\Sigma 2}$ , поскольку току всегда выгоднее прохо-

дить от места повреждения в сторону шин, где собраны экраны всех кабельных линий сети. Если же авария происходит не в середине линии, а вблизи от ее начала (вблизи от шин), то тогда  $I_{\Sigma 1} \gg I_{\Sigma 2}$  и поэтому  $I_{\Sigma 1} \approx I_K$ . Следовательно, всегда сечение  $F_{\Sigma}$  следует выбирать на весь ток короткого замыкания  $I_K$ , а не на какую-то его часть. Тем более это верно, если экраны имеют не двустороннее, а одностороннее заземление.

Кабельным заводам сложно производить трехфазные кабели 6–35 кВ вида рис. 5,а, медные экраны которых выдерживали бы ток  $K(1,1)$  сети с изолированной (компенсированной) нейтралью. Несоответствие фактически выпускаемых сечений реальным токам короткого замыкания сети  $K(1,1)$  является известной проблемой. Для ее решения следует перейти к использованию кабелей вида рис. 5,б, имеющих повышенную стойкость токкам короткого замыкания за счет параллельной работы индивидуальных экранов трех фаз.

**Выбор схемы заземления экранов**

Для однофазных кабелей расчеты проводятся по методике [1] и позволяют выбрать одну из трех типовых схем заземления: двустороннее заземление экранов, одностороннее заземление экранов, транспозиция экранов.

В случае резистивного заземления нейтрали согласно таблице 1 достаточно иметь малое сечение экранов  $F_{\Sigma}$ , что в сочетании с прокладкой трех фаз сомкнутым треугольником дает возможность иметь простое заземление экранов с двух сторон и не беспокоиться о потерях в экранах в силу их незначительности (таблица 2).

Для трехфазных кабелей экраны всегда должны иметь простое заземление с двух сторон. Схемы одностороннего заземления экранов или транспозиции экранов для трехфазных кабелей рис. 5,б эти схемы не нужны потому, что попросту отсутствуют экранные контура, на которые могло бы наводиться напряжение и в которых могли бы проходить токи. Что же касается кабелей рис. 5,а, то здесь при двустороннем заземлении в экранах все же имеются токи и потери, однако они не опасны, поскольку фазы близко расположены (почти сомкнутый треугольник) и сечение экранов мало (заводам иначе не сделать).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотрены основные конструкции кабелей 6–35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Анализ процессов в сетях с такими кабелями позволил дать методику выбора сечений экранов (таблица 1) и схем их заземления (таблица 2).

Было показано, что в сетях 6–35 кВ с изолированной (компенсированной) нейтралью желательнее применение не однофазных, а трехфазных кабелей (особенно если они имеют «соприкасающиеся» экраны). Что же касается однофазных кабелей, то они в большей степени созданы для сетей с резистивным заземлением нейтрали (или глухим), где защиты селективно отключают первое же замыкание на землю.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Дмитриев М.В.* Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 152 с.  
 2. *Дмитриев М.В.* Экраны однофазных кабелей 6–500 кВ. Выбор сечения с учетом апериодической составляющей тока КЗ // *Новости Электротехники*, № 4(88), 2014, стр. 34–37.