

Перенапряжения на изоляции экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ и защита от них

В последнее время силовые кабели высокого напряжения 6-500 кВ современных конструкций все более широко используются для передачи и распределения электроэнергии, особенно в крупных городах и на промышленных предприятиях, где уровень электропотребления и плотность нагрузки весьма значительны. Наибольшее распространение получают силовые однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Способ соединения и заземления экранов кабеля заметно влияет на токи и электрические потери в экранах, а значит на тепловой режим кабеля и его пропускную способность [1]. Для борьбы с паразитными токами и потерями в экранах кабелей могут применяться различные технические решения, такие как частичное (одностороннее) разземление экранов кабелей, транспозиция экранов [1].

В статье рассмотрен один из важных вопросов устройства экранов однофазных кабелей 6-500 кВ — защита изоляции экранов от перенапряжений.

1. Волновые параметры кабеля

Перенапряжения на изоляции «жила-экран» и на изоляции «экран-земля» тесно связаны друг с другом, что в частности, подтверждается расчетами в подробных компьютерных моделях программного комплекса EMTP [2]. Перенапряжения импульсной природы (грозовые и коммутационные), возникающие на изоляции «жила-экран», передаются в изоляцию экрана и в ряде случаев могут представлять опасность. К сожалению, производители кабелей не указывают испытательное напряжение изоляции экрана грозowymi и коммутационными импульсами, отчасти потому, что не проводят таких испытаний. Поэтому судить об опасности импульсных перенапряжений на изоляции экрана приходится экспертно. Сделаем это, рассмотрев двухпроводную линию (рис. 1). Определим напряжение, наводимое на провод №2 при включении провода №1 под напряжение.

При рассмотрении телеграфных уравнений двухпроводной линии в случае идеальной земли (удельное сопротивление грунта $\rho_3 \rightarrow 0$) решение в матричном виде для тока и напряжения может быть записано как сумма прямой (индекс φ) и обратной (индекс ψ) волн [3]:

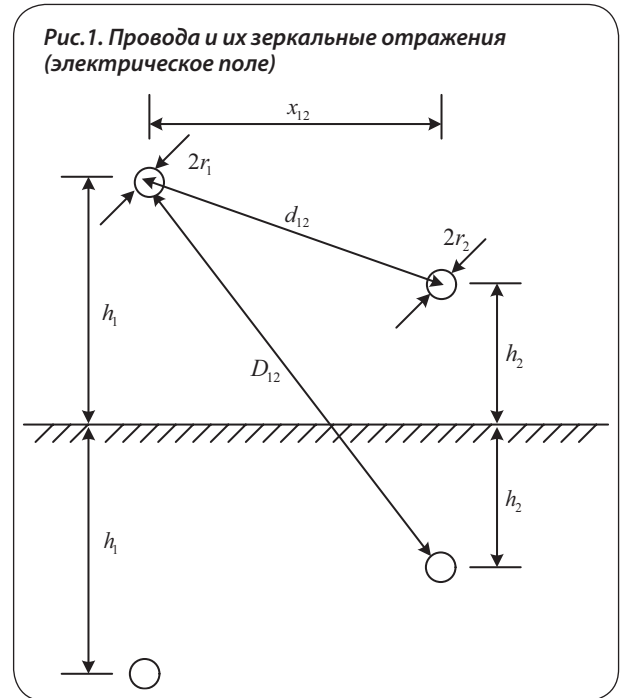


Рис.1. Провода и их зеркальные отражения (электрическое поле)

$$u = u_{\varphi} + u_{\psi},$$

$$i = i_{\varphi} + i_{\psi},$$

$$Z_B \cdot i = u_{\varphi} - u_{\psi},$$

где Z_B — матрица собственных и взаимных волновых сопротивлений, элементы которой можно найти следующим образом:

$$Z_{Bii} = 60 \cdot \ln(2h_i/r_i),$$

$$Z_{Bik} = 60 \cdot \ln(D_{ik}/d_{ik}).$$

Будем считать, что время рассмотрения переходного процесса таково, что можно не учитывать волны тока и напряжения, отраженные от конца проводов №1 и №2 (т.е. $u_{\psi} = 0, i_{\psi} = 0$). Тогда система уравнений двухпроводной линии в матричном виде без учета отраженных волн примет вид

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{\varphi 1} \\ u_{\varphi 2} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} Z_{B11} & Z_{B12} \\ Z_{B21} & Z_{B22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{\phi 1} \\ u_{\phi 2} \end{pmatrix}.$$

Раскрыв матричное уравнение, получим

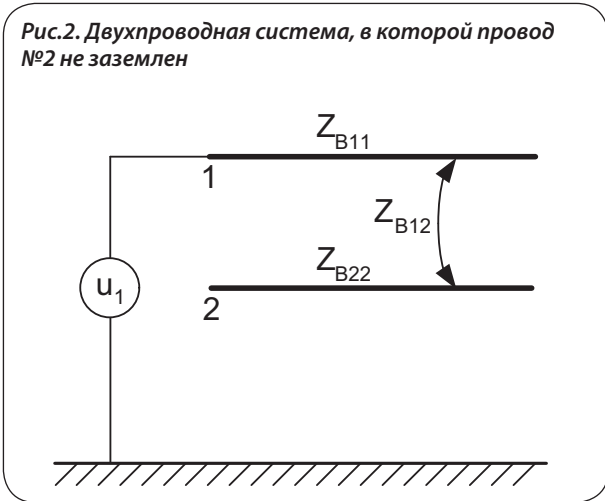
$$u_1 = Z_{B11} \cdot i_1 + Z_{B12} \cdot i_2 \quad (1)$$

$$u_2 = Z_{B21} \cdot i_1 + Z_{B22} \cdot i_2$$

Источниками перенапряжений являются и воздействия молнии на воздушные линии (расположенные в электрически связанной с кабелем сети), и коммутации выключателями (с любой из сторон кабеля). Поэтому заранее нельзя сказать, с какой именно из сторон в кабель попадет волна перенапряжений. Тем не менее, рассмотрим два частных случая: рис. 2 и 3.

Рассмотрим случай рис. 2, когда провод №2 не заземлен в своем начале.

Рис.2. Двухпроводная система, в которой провод №2 не заземлен



Так как провод №2 изолирован, то в его начале $i_2 = 0$. Эквивалентное входное волновое сопротивление провода №1 в этом случае может быть найдено из первого уравнения системы (1), которое с учетом граничных условий имеет вид $u_1 = Z_{B11} \cdot i_1$. Получим

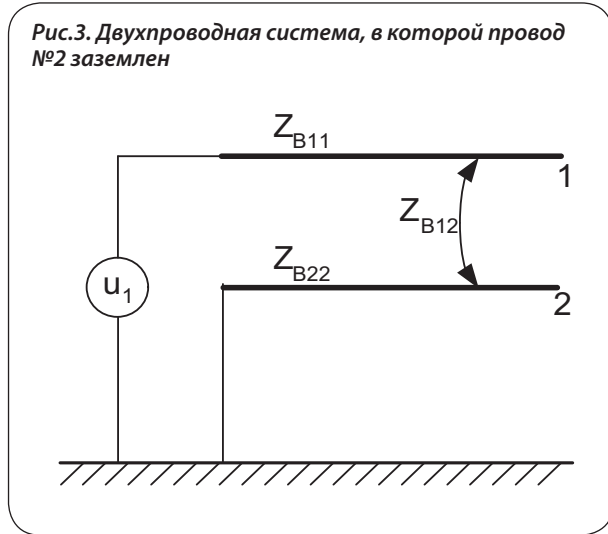
$$Z_{ЭKB} = Z_{B11}.$$

Поделив второе уравнение системы (1) на первое, найдем напряжение, которое будет наведено с первого провода на незаземленный второй

$$u_2 = \frac{Z_{B21}}{Z_{B11}} \cdot u_1.$$

Рассмотрим случай рис. 3, когда провод №2 заземлен в своем начале.

Рис.3. Двухпроводная система, в которой провод №2 заземлен



Так как провод №2 заземлен, то в его начале $u_2 = 0$. Тогда, выразив из второго уравнения системы (1) ток i_2 и подставив его в первое уравнение системы, найдем

$$u_1 = \left[Z_{B11} - \frac{(Z_{B12})^2}{Z_{B22}} \right] \cdot i_1,$$

откуда эквивалентное входное волновое сопротивление провода №1 будет

$$Z_{ЭKB} = Z_{B11} - \frac{(Z_{B12})^2}{Z_{B22}}.$$

т.е. заметно меньше, чем в случае, когда провод №2 не заземлен.

Таким образом, показано, что не только активные индуктивные сопротивления кабеля [1] зависят от способа заземления экрана, но и волновые сопротивления тоже.

Если под проводом №1 понимать жилу однофазного кабеля (рис. 4), а под проводом №2 понимать экран этого кабеля, то с использованием полученных выражений $Z_{ЭKB}$ можно оценить входное волновое сопротивление кабеля и напряжение на экране кабеля относительно земли.

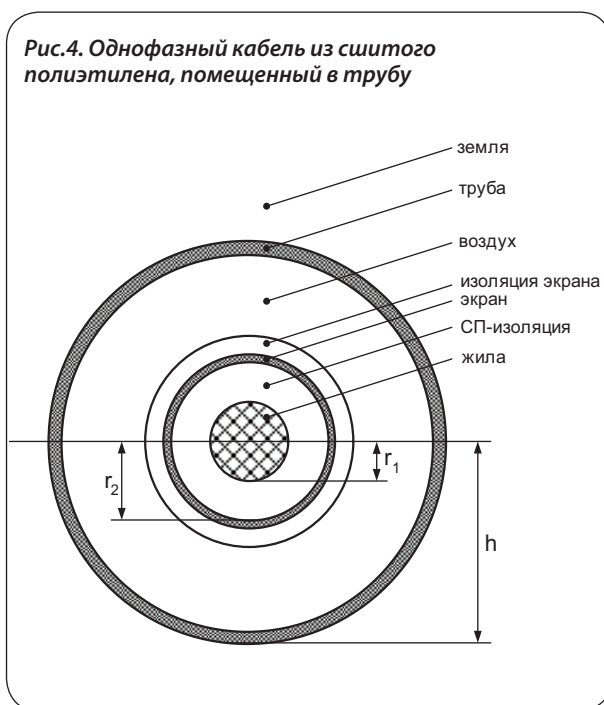
Упрощенно для проведения оценочных расчетов полагаем, что кабель размещен в трубе в ее центре. Волновые сопротивления в системе «жила-экран», показанной на рис. 4, будем вычислять по форму-

лам, справедливым для случая плоской идеальной земли,

$$Z_{B11} \approx 60 \cdot \ln\left(\frac{2h}{r_1}\right),$$

$$Z_{B22} \approx 60 \cdot \ln\left(\frac{2h}{r_2}\right),$$

$$Z_{B12} \approx 60 \cdot \ln\left(\frac{D_{12}}{d_{12}}\right) \approx 60 \cdot \ln\left(\frac{2h}{r_2}\right).$$



Проведем расчеты на примере кабеля 110 кВ: $F_{ж} = 1000 \text{ м}^2$, $\Delta_{жэ} = r_2 - r_1 = 13 \text{ мм}$, что при допущении $\psi_{ж} = 1$ (коэффициент заполнения жилы) соответствует $r_1 = 18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $r_2 = 31 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Дополнительно положим радиус трубы, в которой помещен кабель, равным $h = 0,1 \text{ м}$. Тогда собственное волновое сопротивление жилы можно оценить как

$$Z_{B11} \approx 60 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 0,1}{18 \cdot 10^{-3}}\right) \approx 145 \text{ Ом}$$

собственное волновое сопротивление экрана

$$Z_{B22} \approx 60 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 0,1}{31 \cdot 10^{-3}}\right) \approx 112 \text{ Ом}$$

взаимное волновое сопротивление между жилой и экраном

$$Z_{B12} \approx 60 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 0,1}{31 \cdot 10^{-3}}\right) \approx 112 \text{ Ом}$$

эквивалентное входное волновое сопротивление в случае заземленного экрана (рис. 3)

$$Z_{ЭКВ} = Z_{B11} - \frac{(Z_{B12})^2}{Z_{B22}} = 33 \text{ Ом}$$

2. Перенапряжения на изоляции частично разземленного экрана

В случае, если экран кабеля не заземлен в своем «начале» (т.е. с той стороны, с которой в него приходит волна импульсных перенапряжений), наведенное на него напряжение (без учета волн, отраженных от конца кабеля, на котором экран заземлен) будет

$$u_2 = \frac{Z_{B21}}{Z_{B11}} \cdot u_1 = \frac{112}{145} \cdot u_1 \approx 0,77 \cdot u_1$$

Видно, что напряжение экран-земля на рассматриваемом конце кабеля, с которого в него приходит волна, может быть значительно по величине. При этом длительность повышенного напряжения определяется длиной кабеля совместно со скоростью распространения электромагнитной волны вдоль него, т.е. тем, через какое время в начало экрана вернется волна, несущая информацию о том, что в конце кабеля экран заземлен.

В случае, если экран кабеля заземлен в своем «начале», наводимое на экран напряжение очень мало ($u_2 = 0$). Наибольшее напряжение на экране следует ожидать в его «конце», т.е. в максимально удаленной от места заземления экрана точке, однако оно не опасно для изоляции экрана, так как наличие заземления экрана в начале кабеля серьезно подавляет волны, проникающие в экран.

В случае, если экран кабеля заземлен и в «начале», и в «конце», наибольшие напряжения на экране будут в его средней части, но они не опасны по названной выше причине.

3. Перенапряжения на изоляции транспонированного экрана

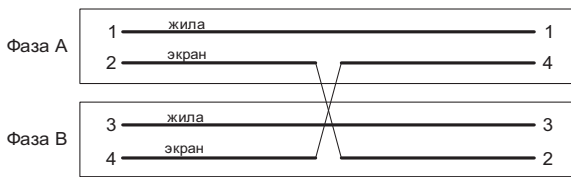
В случае, если экраны группы кабелей заземлены и в «начале», и в «конце», но при этом транспонированы, волновые процессы в экранах усложняются. Дело в том, что узлы транспозиции представляют

собой дополнительные места, в которых (помимо концов кабеля) возникают отраженные и преломленные волны.

Слева и справа от места транспозиции система жила-экран каждого однофазного кабеля, входящего в состав группы кабелей, имеет различные взаимные сопротивления.

В узле транспозиции (рис. 5) экран рассматриваемого кабеля заменяется на экран другого кабеля из группы. Поэтому слева от узла транспозиции справедливо $Z_{B12} \neq 0$, а справа $Z_{B12} = 0$.

Рис.5. Система из двух кабелей, экраны которых транспонированы



Для первого участка кабеля (от «начала» до узла транспозиции) можно записать систему (1), а в месте транспозиции схеме рис. 5 соответствует граничное условие (схема замещения приведена на рис. 6)

$$u_2 = Z_{B22} \cdot i_2,$$

откуда, сравнив это условие со вторым уравнением системы (1), найдем $i_1 = 0$ и, поделив второе уравнение системы (1) на первое, имеем

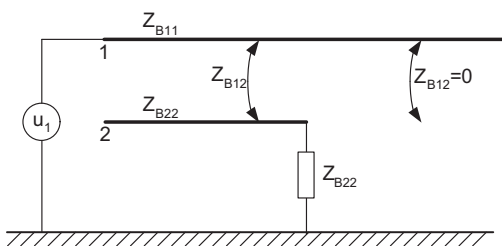
$$u_2 = \frac{Z_{B22}}{Z_{B12}} \cdot u_1.$$

Для кабеля 110 кВ рассматриваемой конструкции получим

$$u_2 = \frac{Z_{B22}}{Z_{B12}} \cdot u_1 = \frac{112}{112} \cdot u_1 \approx u_1.$$

Таким образом, необходимость установки ОПН в месте транспозиции не вызывает сомнения.

Рис.6. Схема замещения для определения напряжений в условиях рис.5



4. Рекомендации по применению ОПН для защиты изоляции экрана

Весьма упрощенные оценки показали, что ОПН для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений изоляции экранов желательно устанавливать и в незаземленных концах экрана (со стороны набегающих волн), и во всех коробках транспозиции. Полученные обобщающие выводы подкрепляются расчетными осциллограммами, полученными с использованием программного комплекса EMTP, но здесь не приведенными.

Сравним импульсные перенапряжения на изоляции экранов однофазных кабелей в сетях 6-35 кВ и в сетях 110-500 кВ.

При волновых процессах в кабеле соотношение u_2/u_1 слабо зависит от класса номинального напряжения кабеля. Поскольку с ростом класса напряжения возрастают максимально возможные значения перенапряжений на изоляции жилы кабеля u_1 , то следует ожидать и роста перенапряжений на изоляции экрана u_2 . Следовательно, перенапряжения на изоляции экранов кабелей 110-500 кВ будут пропорционально выше по сравнению с таковыми для изоляции экранов кабелей 6-35 кВ.

Согласно [1] толщина изоляции экрана практически не изменяется с увеличением номинального напряжения кабеля. Испытания изоляции экрана кабелей так же проводятся одним и тем же постоянным напряжением 10 кВ вне зависимости от класса напряжения 6-500 кВ. Учитывая это, даже не имея данных об импульсной прочности изоляции экрана, можно сделать вывод о том, что прочность экранов почти одинакова для кабелей вне зависимости от класса их номинального напряжения 6-500 кВ.

Следовательно, перенапряжения u_2 на изоляции экранов будут тем больше по сравнению с импульсной прочностью экранов, чем выше класс номинального напряжения кабеля. Иными словами, если в сетях 6-10 кВ применение ОПН для защиты изоляции экранов еще не требуется, то в сетях 35-500 кВ является необходимым.

Итоговые рекомендации по размещению ОПН в сетях даны в табл.1-2. Несмотря на рекомендации

Таблица 1. Рекомендации по применению ОПН для защиты изоляции экранов кабелей.

Кабель	Рекомендации по установке ОПН для защиты изоляции экранов кабелей
6-10 кВ	ОПН не нужны
35-500 кВ	ОПН нужны и должны быть установлены в соответствии с табл. 2

Таблица 2. Применение ОПН для защиты экранов кабелей 35-500 кВ.

№	Состояние экрана	Схема
1	Заземлен в «начале»	
2	Заземлен в «конце»	
3	Заземлен с двух сторон	
4	Применена транспозиция экранов (полных циклов)	

табл.1 ряд организаций применяет ОПН не только для защиты изоляции экранов кабелей 35-500 кВ, но и для 6-10 кВ.

В табл.1-2 даны рекомендации по применению специальных ОПН, предназначенных для защиты изоляции экрана и устанавливаемых между экраном и заземленными элементами электроустановки. Вместе с тем, применение ОПН, как правило, требуется так же и для защиты главной изоляции кабеля – изоляции «жила-экран», однако этот вопрос выходит за рамки статьи.

Специальные ОПН, устанавливаемые в экран, имеют одни и те же характеристики, близкие к ОПН класса 3-6 кВ, вне зависимости от номинального напряжения кабеля 6-500 кВ. В свою очередь ОПН, устанавливаемые для защиты главной изоляции, – это обычные ОПН того же класса напряжения 6-500 кВ, что и защищаемый ими кабель 6-500 кВ.

5. Выбор ОПН для защиты изоляции экрана

Для защиты изоляции экрана относительно земли применяются ОПН специального типа, устанавливаемые в незаземленных концах экранов и в узлах транспозиции. Выбор характеристик [4] перечисленных ОПН, в частности, базируется на результатах расчетов напряжений промышленной частоты на изоляции экрана, которые можно выполнить по методике [1] или с использованием программы «ЭКРАН», в которой эта методика реализована.

Характеристики ограничителя перенапряжений, предназначенного для защиты изоляции экрана кабеля, должны выбираться исходя из двух основных критериев:

- обеспечения надежной защиты изоляции экрана при грозовых и коммутационных перенапряжениях;
- обеспечения надежной работы самого ОПН в установившихся и квазистационарных режимах, т.е. соответственно в нормальном режиме и при коротких замыканиях в сети.

Основными характеристиками современных ОПН являются его наибольшее рабочее напряжение $U_{НРО}$ и энергоемкость $W_{уд}$.

Наибольшее (длительно допустимое) рабочее напряжение ОПН, кВ – наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты $U_{НРО}$ которое неограниченно долго может быть приложено к ОПН (при напряжении большем, чем наибольшее рабочее, ток через ОПН начинает заметно возрастать, что может привести перегреву и повреждению аппарата).

Удельная рассеиваемая (поглощаемая) энергия (энергоемкость), кДж/кВ – рассеиваемая ограничите-

лем без повреждения энергия $W_{уд}$ одного импульса, отнесенная к наибольшему рабочему напряжению ОПН, полученная в процессе испытаний ОПН прямоугольными импульсами тока длительностью 2000 мкс, используемая для классификации ОПН и характеризующая его способность рассеивать энергию перенапряжений.

Важной характеристикой ОПН, определяющей степень защиты оборудования от грозовых перенапряжений, является остающееся напряжение на ОПН при грозовых перенапряжениях.

Остающееся напряжение ОПН, кВ – наибольшее значение напряжения на ОПН при протекании через него импульса тока указанного максимального значения и формы. Остающееся напряжение определяется при импульсных токах стандартной формы.

Грозовой импульс тока формы 8/20 мкс – импульс тока, используемый для определения остающегося напряжения $U_{8/20}$ на ОПН в режиме ограничения грозовых перенапряжений.

Коммутационный импульс тока формы 30/60 мкс – импульс тока, используемый для определения остающегося напряжения $U_{30/60}$ на ОПН в режиме ограничения коммутационных перенапряжений.

Наибольшее возможное действующее значение напряжения промышленной частоты на разомкнутом конце или в узле транспозиции обозначим $U_э$ (определяется по [1]), а время его воздействия на ОПН примем равным T сек. Тогда наибольшее рабочее напряжение ОПН следует выбирать как

$$U_{НРО} \geq \frac{U_э}{K_{Н-В}(T)},$$

где $K_{Н-В}(T)$ – типовая характеристика «напряжение-время» в относительных единицах $U_{НРО}$ рабочего напряжения ОПН, приведенная в табл.3.

Таблица 3. Характеристика «напряжение-время» современных ОПН, задаваемая в относительных единицах для случаев без нагружения (*) и с предварительным нагружением (**).

Длительность приложения повышенного напряжения	Допустимая кратность превышения напряжения на ОПН, не менее
0,1 с	1,50*/1,40**
1 с	1,43*/1,35**
10 с	1,37*/1,30**
100 с	1,31*/1,23**
1200 с	1,23*/1,15**
3600 с	1,19*/1,10**

Если принять $T = 1$ с (время существования короткого замыкания в расчетах термической стойкости экранов кабеля), то наибольшее рабочее напряжение ОПН, устанавливаемого для защиты изоляции экрана кабеля, должно удовлетворять следующему неравенству

$$U_{НРО} \geq \frac{U_{\text{э}}}{1.35}$$

Поскольку выбор способа заземления экрана основан на обеспечении $U_{\text{э}} \leq U_{\text{э}}^{\text{ДОП-1}}$, где $U_{\text{э}}^{\text{ДОП-1}} = 5$ кВ, то наибольшее рабочее напряжение ОПН, как правило, должно удовлетворять неравенству

$$U_{НРО} \geq \frac{U_{\text{э}}^{\text{ДОП-1}}}{1.35} = 3.7 \text{ кВ.}$$

Выбранный таким образом ограничитель перенапряжений, имеющий наибольшее рабочее напряжение $U_{НРО}$ будет иметь остающееся напряжение в режиме ограничения грозовых и коммутационных перенапряжений $U_{8/20}$ и $U_{30/60}$. Связь остающихся напряжений $U_{8/20}$, $U_{30/60}$ и наибольшего рабочего напряжения $U_{НРО}$ следующая

$$U_{8/20} = (\sqrt{2} \cdot U_{НРО}) \cdot K_{8/20}$$

$$U_{30/60} = (\sqrt{2} \cdot U_{НРО}) \cdot K_{30/60}$$

где $K_{8/20}$ и $K_{30/60}$ – кратности ограничения грозовых и коммутационных перенапряжений, которые для современных ОПН, как правило, близки к $K_{8/20} = 2,1$ и $K_{30/60} = 1,9$.

Если напряжения $U_{8/20}$ и $U_{30/60}$ с запасом меньше импульсной прочности изоляции экрана при перенапряжениях, то выбор ОПН произведен правильно.

Если напряжение $U_{8/20}$ или $U_{30/60}$ выше импульсной прочности изоляции экрана, то необходимо использовать ОПН с более низким значением $U_{НРО}$, что оказывается возможным за счет снижения воздействующих на ОПН напряжений промышленной частоты $U_{\text{э}}$, достигаемого увеличением числа мест заземления экранов или увеличением числа циклов транспозиции.

Производители кабелей не предоставляют информации об импульсной прочности изоляции экрана, называя лишь 10 кВ – постоянное напря-

жение, которым испытывается изоляция экрана перед вводом кабеля в эксплуатацию. Учитывая заметное повышение прочности изоляции кабелей на импульсных напряжениях по сравнению с постоянным, вполне допустимо принимать $U_{НРО} = 5$ кВ, что обеспечит:

- надежную работу ОПН даже при длительно существующих ($T \gg 1$ с) в сети коротких замыканиях, сопровождаемых повышением напряжения на экранах относительно земли;
- достаточно надежную защиту изоляции экрана кабеля при грозовых и коммутационных перенапряжениях.

Согласно расчетам, выполненным в ЕМТР, в ограничителе перенапряжений ОПН, установленном для защиты изоляции экрана, протекают лишь незначительные импульсные токи, что объясняется большим сопротивлением между жилой и экраном, отделяющим этот ОПН от источника импульсных перенапряжений – волновых процессов в жиле кабеля. Поэтому энергоемкость ОПН, предназначенного для защиты изоляции экрана, может быть принята минимальной – равной 2-3 кДж/кВ (значение приведено к наибольшему рабочему напряжению ОПН и указано для одного импульса тока длительностью 2000 мкс).

Другие (помимо $U_{НРО}$, $W_{уд}$) параметры ограничителей перенапряжений ОПН, предназначенных для защиты изоляции экрана, имеют второстепенное значение и практически однозначно определяются перечисленными в скобках характеристиками.

М.В. Дмитриев к.т.н., начальник отдела научно-технических исследований ЗАО «Завод энергозащитных устройств»

Список использованных источников

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. — СПб.: Изд-во «НИВА», 2008. — 104 с.
2. EMTP Rule book. Bonneville Power Administration, Branch of System Engineering. Portland, Oregon 97208-3621, USA, 1986 (www.emtp.org).
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники/ в двух томах. – Л.: «Энергия», 1967.
4. Дмитриев М.В. Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ. – СПб.: Изд-во «НИВА», 2007. – 60 с. ISBN 5-86456-081-2.