

Метод определения потерь активной мощности в экранах кабелей распределительных сетей

ВАСИН В.П., МАЙОРОВ А.В., ШУНТОВ А.В.

Исследованы относительные потери активной мощности в экранах кабелей распределительных электрических сетей 10–20 кВ. Учтены наиболее жесткие расчетные условия, влияющие на пропускную способность кабельных линий – заземление экранов с обеих сторон. Показано, что при рациональном формировании сетей относительные потери мощности в экранах не столь значительны по сравнению с их теоретическим максимумом. Предложен способ определения относительного распределения потерь мощности в экранах и токоведущих жилах для сетей с изолированной нейтралью (или с компенсацией емкостного тока замыкания на землю) и для сетей с нейтралью, заземленной через низкоомное сопротивление.

Ключевые слова: *распределительные электрические сети, потери мощности, экраны кабельных линий, режимы заземления нейтралей*

В последние годы в распределительных сетях 10–20 кВ широкое применение получили однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Они состоят из изолированных друг от друга жил и экранов, а также внешней изоляции. Вопросам обоснования и выбора способов заземления экранов кабелей посвящено большое число публикаций. Они сопровождаются обилием громоздких выкладок, сложных формул, программ расчета для ЭВМ. Складывается впечатление, что при проектировании кабельных линий вопросы заземления их экранов являются центральными с позиций минимизации в них потерь мощности, поскольку это заметно влияет на пропускную способность линий. Представляется, что для распределительных сетей данная проблематика чрезмерно утяжелена.

Рассмотрим кабельную линию, в которой экраны заземлены с обеих сторон. В этом случае при протекании тока по жиле вследствие взаимной индукции между ней и экраном в нем наводится ток. Во многих случаях отмечается, что этот ток может быть сопоставим с рабочим током. Как следствие возникают потери мощности не только в жиле, но и в экране, что приводит к снижению пропускной способности кабельной линии.

При заземлении экрана с одной стороны, очевидно, индуцированный в нем ток отсутствует. Поэтому далее рассматриваются кабели с экранами, заземленными по обоим концам, т.е. наиболее тяжелое расчетное условие. Также во внимание не принимаются токи утечки через взаимную емкость между жилой и экраном: их влияние на тепловой режим кабеля значительно меньше по сравнению с влиянием индуцированного тока в экране.

По известным причинам однофазные кабели, как правило, укладываются треугольником, поэто-

му воспользуемся известной формулой коэффициента потерь активной мощности, из [1]

$$DP_{\text{э}} / DP_{\text{ж}} = (R_{\text{э}} / R_{\text{ж}}) / (1 + (R_{\text{э}} / X)^2), \quad (1)$$

где $DP_{\text{э}}$ – потери мощности в экране; $DP_{\text{ж}}$ – потери мощности в жиле кабеля; $R_{\text{э}}$ – активное сопротивление экрана на единицу длины кабеля при его максимальной рабочей температуре, Ом/м; $R_{\text{ж}}$ – то же, для жилы кабеля; X – индуктивное сопротивление экрана на единицу длины кабеля (Ом/м), равное [1]

$$X = 4\pi f 10^{-7} \ln(2s/d). \quad (2)$$

Здесь f – частота электрического тока, Гц; s – расстояние между осями жил кабеля, мм; d – средний диаметр экрана, мм.

Обратим внимание, что формула (1) получена из уравнения, связывающего ток в экране $I_{\text{э}}$ и ток в жиле $I_{\text{ж}}$; вывод этого уравнения приведен в литературе, например в [2] (очевидно, что $DP_{\text{э}} = I_{\text{э}}^2 R_{\text{э}}$ и $DP_{\text{ж}} = I_{\text{ж}}^2 R_{\text{ж}}$):

$$I_{\text{э}} / I_{\text{ж}} = 1 / (1 + (R_{\text{э}} / X)^2)^{0,5}. \quad (3)$$

Обозначим в (1)

$$R_{\text{э}} / (1 + (R_{\text{э}} / X)^2) = R_{\text{экв}}, \quad (4)$$

тогда (1) можно записать в виде

$$DP_{\text{э}} / DP_{\text{ж}} = R_{\text{экв}} / R_{\text{ж}}, \quad (5)$$

откуда

$$DP_{\text{э}} = (R_{\text{экв}} / R_{\text{ж}}) DP_{\text{ж}} = (R_{\text{экв}} / R_{\text{ж}}) I_{\text{ж}}^2 R_{\text{ж}} = I_{\text{ж}}^2 R_{\text{ж}}, \quad (6)$$

Таким образом, выражение (6) – это потери мощности в экране, выраженные через ток в жиле.

Функция (5) характеризует отношение потерь мощности в экране к потерям мощности в жиле, что очень важно при выборе экрана. А соотношение (6) дает возможность непосредственно установить зависимость потерь мощности в экране от его параметров. И то и другое определяется зависимостью $R_{\text{экв}}(R_{\text{э}} X)$, поэтому подробно рассмотрим эту функцию. С учетом (4)

$$dR_{\text{экв}} / dR_{\text{э}} = (1 - (R_{\text{э}} / X)^2) / (1 + (R_{\text{э}} / X)^2)^2. \quad (7)$$

Производная $dR_{\text{экв}} / dR_{\text{э}}$ положительна при $R_{\text{э}} < X$, равна 0 при $R_{\text{э}} = X$ и отрицательна при $R_{\text{э}} > X$. При $R_{\text{э}} \textcircled{R} \neq R_{\text{экв}} \textcircled{R} 0$. Точка экстремума (4) будет, очевидно, при $R_{\text{э}} = X$, что следует из приравнивания правой части (7) нулю. Тогда максимум $R_{\text{экв}} = X/2$, а максимум $DP_{\text{э}} = I_{\text{ж}}^2 X/2$ (см. (6)); максимум (5) с учетом (4) получим при

$$DP_{\text{э}} / DP_{\text{ж}} = X / (2R_{\text{ж}}). \quad (8)$$

Таким образом, максимум коэффициента потерь мощности зависит от соотношения индуктивного сопротивления экрана и активного сопротивления жилы кабеля.

Рассмотрим интенсивно развиваемые в последние годы электрические сети 20 кВ Москвы. Питающие кабельные линии 20 кВ, как правило, выполнены алюминиевым одножильным кабелем сечением 500 мм² с медным экраном. Наружный диаметр кабеля 49,8 мм, толщина наружной изоляции 3,2 мм (геометрические характеристики кабелей различных заводов-изготовителей обычно варьируются на несколько миллиметров в ту или другую сторону).

По (2) получим

$$X = 4\pi 50 \times 10^{-7} \ln(2 \times 49,8 / (49,8 - 2 \times 3,2)) = 5,2 \times 10^{-5} \text{ Ом/м.}$$

Активное сопротивление проводника определяется по известной формуле:

$$R = R_{20}(1 + a_{20}(q - 20)) = (r_{20} / S)(1 + a_{20}(q - 20)), \quad (9)$$

где R_{20} – активное сопротивление проводника при 20 °С, Ом/м; a_{20} – температурный коэффициент при 20 °С, 1/К; q – рабочая температура, °С; r_{20} – удельное сопротивление проводника при 20 °С, Ом·мм²/м; S – сечение проводника, мм².

Для алюминиевой жилы по (9) имеем:

$$R_{\text{ж}} = (0,0283/500)(1 + 0,00403(90 - 20)) = 7,26 \times 10^{-5} \text{ Ом/м.}$$

Следовательно, максимум отношения (8) для рассматриваемого кабеля 20 кВ составляет $DP_{\text{э}} / DP_{\text{ж}} = 5,2 \times 10^{-5} / (2 \times 7,26 \times 10^{-5}) = 0,36$ или 36%.

Как отмечалось ранее, максимум $DP_{\text{э}} / DP_{\text{ж}}$ достигается при $R_{\text{э}} = X$. Тогда возникает закономерный вопрос, какое должно быть сечение экрана $S_{\text{э}}$, чтобы достичь в нем наибольших потерь? Для этого решим (9) при известном $R_{\text{э}} = X$: $5,2 \times 10^{-5} = (0,0172 / S_{\text{э}})(1 + 0,00393(90 - 20))$, откуда $S_{\text{э}} = 422 \text{ мм}^2$. Такое сечение более чем на порядок превышает требуемое значение для сети 20 кВ. Поэтому опустим последовательные уточнения, учитывающие изменения индуктивности экрана при значительном увеличении $S_{\text{э}}$ и геометрических характеристик кабеля соответственно.

Действительно, минимальное сечение экрана кабеля определяется условиями их термической стойкости при коротких замыканиях (КЗ). В распределительных сетях 10–20 кВ московского региона, например, в зависимости от фактических расчетных условий сечения медных экранов находятся в диапазоне от 16 до 70 мм². Заводы-изготовители для номинальных сечений экранов нормируют односекундные токи термической стойкости. Допустим, для медного экрана 16 мм² – 3,3 кА, 35 мм² – 7,1 кА, 50 мм² – 10,2 кА, 70 мм² – 14,2 кА.

В Москве электрическая сеть 20 кВ выполнена с низкоомным резистивным заземлением нейтралей трансформаторов. Сопротивление резисторов на всех питающих центрах единообразно и равно $R_{\text{р}} = 12 \text{ Ом}$. Это обеспечивает при однофазных замыканиях на землю в любой точке сети ток $I_{\text{озз}} = U_{\text{ном}} / (1,73 R_{\text{р}}) = 20 / (1,73 \times 12) = 0,96 \text{ кА}$, где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети. Это максимальное значение для сетей 20 кВ. В частности, за рубежом сопротивления резисторов выбираются так, чтобы обеспечить и более низкие значения $I_{\text{озз}} = 0,3–0,5 \text{ кА}$, т.е. не только 0,96 кА. Стандартные выдержки времени токовых защит отходящих линий 20 кВ на питающих центрах 110–220/20 кВ обычно равны 1 с.

Еще одним расчетным условием для сети 20 кВ может быть трехфазное КЗ, при котором в экранах кабелей наводится ток, больший, нежели в нормальном режиме. Максимальное значение трехфазного тока КЗ на стороне 20 кВ питающих центров 110–220/20 кВ региона не превышает 14 кА. Оценим по формуле (3) наведенный ток в экране кабеля (одножильные алюминиевые кабели сечением 500 мм²) при трехфазном КЗ с использованием медного экрана минимального сечения 16 мм², т.е. с самым низким током термической стойкости.

Здесь, как и ранее, $X = 5,2 \times 10^{-5} \text{ Ом/м}$. Причина кроется в том, что в заданном диапазоне сечений экранов геометрические размеры кабеля от них практически не зависят: увеличение сечения экранов обеспечивается укладкой большего числа медных проволок по окружности внутренней изоля-

ции. Из (9) $R_3 = (0,0172/16)(1+0,00393(90-20)) = 1,37 \times 10^{-3}$ Ом/м, тогда $I_3/I_{ж} = I_3/14 = 1/(1+(1,37 \times 10^{-3}/5,2 \times 10^{-5}))2,0,5$ и $I_3 = 0,53$ кА.

Как видно, в данном случае наиболее тяжелым является режим однофазного замыкания на землю, когда через экран протекает ток 0,96 кА, что меньше односекундного тока термической стойкости экрана, равного 3,3 кА. При времени t , отличном от 1 с, к данному току вводится поправка $1/(t)^{0,5}$ [3]. При выдержке времени защит 1 с время t необходимо увеличить на собственное время отключения выключателя с приводом. Однако для современного коммутационного оборудования – это 50–70 мс, что почти не влияет на термическую стойкость экранов кабелей.

Таким образом, для наиболее широко используемых в резистивно заземленной электрической сети 20 кВ питающих кабельных линий сечением 500 мм² нет нужды увеличивать сечение экранов сверх минимального значения 16 мм². При этом по (1)

$$DP_3 / DP_{ж} = (1,37 \times 10^{-3}/7,26 \times 10^{-5}) / (1 + (1,37 \times 10^{-3}/5,2 \times 10^{-5})^2) = 0,027 \text{ или } 2,7\%.$$

Итак, при принятых расчетных условиях теоретический максимум отношения потерь мощности в экране к потерям мощности в жиле кабеля оказался равным 36% при сечении экрана 422 мм². Однако при необходимом по условию термической стойкости сечении экрана 16 мм² это отношение составило всего 2,7%.

Как изменится коэффициент потерь при вариации сечения жилы кабеля? Рассмотрим, например, вместо кабеля с сечением жилы 500 мм² и экраном 16 мм² кабель с сечением жилы 240 мм² и тем же экраном по условию его термической стойкости. В выражении (1) в 500/240=2,1 раза возрастет $R_{ж}$ (9) и не изменится R_3 . При расчете X сразу обратим внимание, что оно зависит от соотношения геометрических параметров, стоящих под знаком логарифма – формула (2). Учитывая известные свойства логарифмических функций, можно утверждать, что X при этом изменится крайне незначительно. Действительно, у кабеля с жилой 240 мм² наружный диаметр 42,8 мм, толщина наружной изоляции 3,0 мм, откуда $X = 4\rho 50 \times 10^{-7} \ln(2 \times 42,8 / (42,8 - 2 \times 3,0)) = 5,3 \times 10^{-5}$ Ом/м, т.е. уменьшение сечения жилы кабеля в 2,1 раза привело к изменению его индуктивного сопротивления в $(5,3 \times 10^{-5}) / (5,2 \times 10^{-5}) = 1,02$ раза, чем можно пренебречь. Следовательно, при уменьшении сечения жилы кабеля в 2,1 раза во столько же раз возрастет сопротивление жилы и согласно (1) в 2,1 раза снизится коэффициент потерь, т.е. с 0,027 до $0,027/2,1 = 0,013$ или 1,3%. Ана-

логично при увеличении сечения жилы кабеля с 500 до 800 мм² (максимальное значение для современных ячеек комплектных распределительных устройств 20 кВ), т.е. в 1,6 раза, коэффициент потерь увеличится с 0,027 до $0,027 \times 1,6 = 0,043$ или 4,3%.

Таким образом, в разумно построенной электрической сети 20 кВ рассматриваемая в специализированной литературе проблема «катастрофического» влияния потерь мощности в экранах кабелей на их режимы работы (в первую очередь – на дополнительный нагрев кабелей с последующим заметным снижением их пропускной способности) не существует.

Иные соотношения имеют место в сетях 10 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью. В этом случае при оценке термической стойкости экранов априори учитывают двухфазное КЗ: одновременно два однофазных замыкания на землю на двух отходящих кабельных линиях, поэтому иногда говорят не о двухфазном, а о двухместном КЗ.

Максимальный ток трехфазного КЗ на шинах 10 кВ в московском регионе обычно не превышает 12 кА. Следовательно, ток двухфазного КЗ может достигать 10,4 кА. Как видно, для оценки термической стойкости кабелей в сети 10 кВ расчетный ток КЗ на порядок больше, чем в сети 20 кВ. Указанному току КЗ соответствует медный экран сечением 70 мм².

У кабеля 10 кВ с алюминиевой жилой сечением 500 мм² и медным экраном 70 мм² наружный диаметр равен 47,2 мм, а толщина наружной изоляции 3,2 мм. Для него $R_3 = (0,0172/70)(1+0,00393(90-20)) = 3,13 \times 10^{-4}$ Ом/м; $R_{ж} = 7,26 \times 10^{-5}$ Ом/м; $X = 4\rho \cdot 50 \times 10^{-7} \ln(2 \times 47,2 / (47,2 - 2 \times 3,2)) = 5,27 \times 10^{-5}$ Ом/м, откуда $DP_3 / DP_{ж} = (3,13 \times 10^{-4} / 7,26 \times 10^{-5}) / (1 + (3,13 \times 10^{-4} / 5,27 \times 10^{-5})^2) = 0,119$ или 11,9%.

По аналогии с ранее выполненными обоснованиями изменение сечения жилы кабеля от 240 до 800 мм обусловит диапазон коэффициента потерь от 5,7 до 19,0%. При этом питающие кабельные линии в сети 10 кВ региона, как правило, имеют сечение до 500 мм². В распределительных кабельных линиях (т.е. в линиях после распределительных пунктов) сечения жил кабелей обычно меньше 500 мм² и, кроме того, при этом более низкие выдержки времени. Последнее позволяет использовать сечения экранов менее 70 мм², например 35–50 мм², тем самым еще более снижая коэффициент потерь.

Итак, в сети 10 кВ по сравнению с сетью 20 кВ обнаруживаются значительно более жесткие требования к сечениям экранов кабелей вследствие различного режима заземления нейтралей. При этом коэффициент потерь мощности может находиться

в диапазоне от 5,7 до 11,9% для наиболее часто используемых номинальных сечений жил кабелей.

Если учитывать общепринятую инженерную точность расчетов на уровне 10%, то следует признать, что для кабелей 10 кВ с сечением жилы 500 мм² потери мощности в экранах превышают это пороговое значение (11,9%) и подлежат обязательному учету. Вместе с тем, влияние этого фактора гораздо менее весомо в сравнении с изменением пропускной способности кабельных линий в зависимости от того или иного способа их прокладки. Далее приведены данные по пропускной способности питающих кабельных линий 20 кВ при различных способах прокладки:

Способ прокладки кабеля	Пропускная способность, %
Одиночный кабель в воздухе	100
В коллекторе при типичных условиях ¹	81
В траншее на глубине 0,8 м при типичных условиях ²	74
В трубной канализации на глубине от 0,8 до 4 м в трубах длиной менее 10 м	57–74
длина 10 м и более	51–67
В закрытых переходах в трубах при типичных условиях ³ на глубине	
5–10 м	45
10–15 м	40
15–20 м	38

¹ На полках из листового материала (несгораемых перегородок); два кабеля на полке; число полок 4–6;

² Два кабеля в траншее; удельное термическое сопротивление грунта 1,2 Кж/Вт.

³ Два кабеля в одном закрытом переходе, каждый кабель в трубе, плюс резервная труба; пропускная способность – при максимальной глубине из приведенного диапазона.

Как следует из приведенных данных, прокладка кабелей в трубной канализации на различной глубине может снижать их пропускную способность на десятки и даже сотни процентов.

Выводы. 1. Зависимость отношения потерь мощности в экранах к потерям мощности в жилах кабелей (коэффициент потерь мощности) имеет нелинейный характер с точкой экстремума в области чрезвычайно больших нерасчетных сечений экранов. При этом максимум коэффициента потерь мощности зависит от соотношения индуктивного сопротивления экрана и активного сопротивления жилы кабеля.

2. При сечении экранов кабелей, выбранных по условиям их термической стойкости, коэффициент

потерь мощности оказывается значительно ниже значения, характерного для точки экстремума.

3. В электрической сети 20 кВ (сеть с низкоомным резистивным заземлением нейтралей) значение коэффициента потерь мощности невелико и им можно пренебречь при обосновании и выборе параметров кабельных линий.

4. В электрической сети 10 кВ (сеть с изолированными или компенсированными нейтралью) значение коэффициента потерь мощности может превысить 10% (для кабелей с сечением жилы 500 мм² и выше). Данный факт необходимо принимать во внимание при обосновании и выборе пропускной способности кабельных линий. Тем не менее влияние этого фактора гораздо менее весомо в сравнении с изменением пропускной способности кабельных линий в зависимости от того или иного способа их прокладки

5. Приведенные доводы являются еще одним аргументом в пользу перевода сетей 10 кВ с режима изолированной или компенсированной нейтрали на режим с низкоомным резистивным заземлением нейтрали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009.** Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1–1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100%-й коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2009, 29 с.

2. **Дмитриев М.В.** Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010, 154 с.

3. **Руководящие указания** по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/Под ред. Б.Н. Неклепаева. — М.: Изд-во ЭНАС, 2001, 152 с.

4. **Майоров А.В.** Техничко-экономические аспекты развития электрических сетей напряжением 20 кВ. — ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2015, № 4, с. 74–79.

[19.10.15]

Авторы: Васин Владислав Петрович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1960 г. В 1988 г. защитил докторскую диссертацию «Развитие топологических методов исследования режимов электроэнергетических систем» в МЭИ. Главный технолог ПАО «Специализированное проектно-конструкторское бюро по ремонту и реконструкции» (ПАО «СПКБ РР»).

Майоров Андрей Владимирович окончил ЭЭФ МЭИ в 1994 г. Генеральный директор ПАО «Объединенная энергетическая компания».

Шунтов Андрей Вячеславович окончил ЭЭФ МЭИ в 1982 г. В 2002 г. защитил докторскую диссертацию «Применение системного подхода к формированию схем выдачи мощности электростанций» в МЭИ. Генеральный директор ПАО «СПКБ РР».

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 3, pp. 23–27.

Once More About Active Power Losses in the Shields of Distribution Network Cables

VASIN Vladislav Petrovich (*Public Company «Specialized Design Bureau for Repair and Reconstruction» (PC «SDBRR»*), Moscow, Russia) – Chief Technologist, Dr. Sci. (Eng.)

MAIOROV Andrei Vladimirovich (*PC «United Energy Company»*, Moscow, Russia) – Director General

SHUNTOV Andrei Vyacheslavovich (*PC «SDBRR»*, Moscow, Russia) – Director General, Dr. Sci. (Eng.)

Relative active power losses in the shields of 10–20 kV distribution network cables are studied. The use of cable shields grounded at both ends, which brings about the most stringent design conditions affecting the cable line transmission capacity, is taken into account. It is shown that with rationally configured networks, the relative power losses in the shields are not so significant as compared with their theoretical maximum. A method for determining the relative distribution of power losses in cable shields and cores is proposed for networks with insulated neutral (or with compensation of capacitive ground fault current) and for networks with the neutral grounded via a low-impedance resistor.

Key words: *distribution electric networks, power losses, cable line shields, neutral grounding conditions*

REFERENCES

1. **GOST R MEC-1-1–2009.** *Kabeli elektricheskiye. Raschet tokovoi nagruzki. Chast 1-1. Uravneniya dlya rascheta nominal'noi tokovoi nagruzki (100%-i koeffitsient nagruzki) i raschet poter'. Obshchiye polozheniya* (GOST R IEC 60287-1-1–2009: Electric Cables - Calculation of the Current Rating - Part 1-1: Current Rating Equations (100% load factor) and Calculation of Losses – General Provisions). Moscow, Publ. Standartinform, 2009, 29 p.
2. **Dmitriyev M.V.** *Zazemleniye ekranov odnofaznykh silovykh kabelei 6–500 kV.* (Ground shields of single-phase power cables 6–500 kV). St. Petersburg, Publ. Polytechnical University, 2010, 154 p.
3. **Rukovodyashchiye ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya i vyboru elektrooborudovaniya/Pod red. B.N. Neklpayeva** (Guidelines for Calculating Short-Circuit Currents and Selecting Electrical Equipment, Ed. by B.N. Neklpayev). Moscow, Publ. ENAS, 2001, 152 p.
4. **Maiovov A.V.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye – in Russ. (Electricity. Transmission and Distribution)*, 2015, No. 4, pp. 74–79.