

УДК 621.311

Н.П. Бадалян¹, Г.П. Колесник¹, Е.А. Чацин²

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Россия

²Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева,
Ковров, Россия

ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭКРАНА ОДНОФАЗНЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Одной из основных причин роста повреждаемости однофазных кабельных линий выполненных электрическим кабелем нового поколения, использующим в качестве изоляции сшитый полиэтилен, является неверный выбор сечения экрана и схем его заземления в части учета наведенных токов и вызванных ими потерь мощности. В статье рассмотрена возможность решения актуальной задачи исследования электрического режима экрана однофазного электрических кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при заземлении экрана кабеля с двух концов. Предложена схема замещения и выполнено теоретическое исследование особенностей протекания тока в экране кабеля и земле, а также анализ потерь активной мощности в экране с учетом сопротивления заземлителей. Получены расчетные соотношения для определения тока в «земляном канале» и экране силового кабеля нового поколения с изоляцией выполненной из сшитого полиэтилена. Установлена взаимосвязь между токами жилы кабеля, экрана кабеля и «земляного канала». Приведены результаты вычислительного эксперимента по определению значений тока «земли» для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с различными сечениями экрана. Выполнена оценка потерь активной мощности в земле, жиле и экране кабеля при заземлении с двух сторон и перенапряжения на экране кабеля при одностороннем заземлении. Показано, что для реализации мероприятий по оптимизации потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий целесообразным является построении однофазной кабельной линии двумя кабелями изоляцией выполненной из сшитого полиэтилена. При этом выполнение однофазной двухпроводной линии электропередачи с проводами разного сечения вследствие увеличения потерь электроэнергии нецелесообразно.

Ключевые слова: однофазное включение, силовой кабель, режим экрана, СПЭ-изоляция, термическая устойчивость, токи короткого замыкания, невозгорание изоляции, заземление экрана, ток «земляного канала», потери мощности, перенапряжения.

N.P. Badalyan¹, G.P. Kolesnik¹, Ye.A. Chashchin²

¹Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs,
Vladimir, Russian Federation

²Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyareva,
Kovrov, Russian Federation

THE CONNECTION SCREEN SINGLE-PHASE POWER CABLES WITH XLPE INSULATION

One of the main reasons for the increase in the damage of single-phase cable lines made by an electric cable of a new generation, using cross-linked polyethylene as an insulation, is the wrong choice of the screen section and its grounding schemes in terms of accounting for induced currents and the power losses caused by them. In the article considered the possibility of solving actual problems of study of the electrical screen mode single-phase power cables with XLPE insulation with over-Zeleniy cable shield at both ends. The scheme of substitution is offered and theoretical research of features of current flow in the cable screen and the earth is executed, and also the analysis of losses of active power in the screen taking into account resistance of grounding conductors. The calculated ratios for determining the current in the "earth channel" and the screen of the power cable of the new generation with insulation made of cross-linked polyethylene are obtained. The interrelation between the currents of cable core, cable screen and "earth channel" is established. The results of a computational experiment to determine the values of the "earth-Lee" current for cables with cross-linked polyethylene insulation with different screen cross-sections are presented. The estimation of active power losses in the ground, core and cable screen at grounding on both sides and overvoltage on the cable screen at one-way grounding is performed. It is shown that for the implementation of measures to optimize energy losses in power supply systems of industrial enterprises it is advisable to build a single-phase cable line with two cables insulation made of cross-linked polyethylene. At the same time, the implementation of a single-phase two-wire power line with wires of different cross sections due to an increase in electricity losses is impractical.

Keywords: the inclusion of single-phase power cable, the screen mode, CPE-insulation, heat-resistance, short-circuit currents, newsorange isolation, grounding of the shield, the current "earthen channel", loss of power, overvoltage.

Введение. В настоящее время, по данным ОАО «МРСК Северо-Запада», в России накоплен значительный опыт в эксплуатации кабельных линий среднего и высокого напряжения, общая протяженность которых составляет 7 571,8 км [1]. Однако в силу определенных причин физический износ эксплуатируемого кабельного парка находится на уровне 70–80 %, а удельная повреждаемость кабельных линий в среднем достигает 4,5–7 случаев на 100 км/год [2]. Относительно высокая повреждаемость кабельных линий и значительная их протяженность делают актуальным выполнение плановых мероприятий по замене изношенных кабельных линий с преимущественным применением на напряжение 6–500 кВ электрических кабелей нового поколения, использующих в качестве изоляции сшитый полиэтилен (СПЭ), отли-

чающихся рядом преимуществ по отношению к устаревшим кабелям с бумажной пропитанной изоляцией. В частности, согласно требованиям СТО 34.01-27.3-002-2014 введено ограничение на применение кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на подстанциях напряжением 35 кВ и выше. Однако практический опыт применения кабелей 6–500 кВ с СПЭ-изоляцией показал, что повреждаемость таких кабелей в ряде случаев оказывается даже выше, чем у применяемых ранее кабелей с бумажной пропитанной изоляцией [3–5]. Одной из основных причин роста повреждаемости является неверный выбор сечения экрана и схем его заземления в части учета наведенных токов и вызванных ими потерь мощности. Вызвано это тем, что кабели с СПЭ-изоляцией выпускаются в основном в однофазном исполнении. В отличие от зарубежного опыта промышленно-развитых стран, в которых на среднем напряжении широкое распространение получили сети с резистивно-заземленной нейтралью, в отечественных сетях применение однофазных кабелей преимущественно относится к работе с изолированной нейтралью [6].

В результате при возникновении однофазного повреждения изоляции в силу небольших токов короткого замыкания не получается выявить аварийный режим типовыми средствами релейной защиты и оперативно отключить поврежденный кабель. В свою очередь, длительная работа в аварийном режиме приводит к тому, что при действии коммутационных перенапряжений на любом другом участке кабельной линии возникает второе замыкание на землю, что приводит к возникновению двойного короткого замыкания. В связи с этим для повышения термической стойкости экранов к токам короткого замыкания широкое распространение получила практика выбора сечения экрана в сети 6–35 кВ на ток двойного короткого замыкания [7]. Однако увеличение сечения экрана при эксплуатации кабеля с СПЭ-изоляцией при двухстороннем заземлении приводит к нелинейному росту наведенных в экранах токов и вызванных ими потерь активной мощности. Таким образом, в теории и практике эксплуатации силовых однофазных кабелей с СПЭ-изоляцией при заземлении экрана кабеля с двух концов возникает противоречие между требованием к повышению термической стойкости и снижению роста потерь в экранах от наведенных токов [8]. Это делает актуальным решение задачи исследования электрического режима экрана однофазного кабеля с СПЭ-изоляцией.

Одним из путей решения актуальной задачи является определение токов в экране кабеля и земле, а также потерь активной мощности в экране по предложенной схеме замещения с учетом сопротивления заземлителей.

Научная новизна предложенного в статье решения заключается в получении расчетных соотношений и установлении взаимосвязи между токами в жиле, земле и экране кабеля, заземленного с двух концов с учетом сопротивления заземлителей.

Основное содержание статьи. Силовые кабели, независимо от типа изоляции, выбирают по расчетному току, номинальному напряжению, способу прокладки, условиям окружающей среды и проверяют на термическую устойчивость при коротком замыкании путем расчета минимальной площади сечения токоведущей жилы [9]. После расчета минимальной площади сечения токоведущей жилы по термической устойчивости уточняют сечение токоведущих жилы силовых кабелей с учетом установленной мощности электроприемников и проверяют его по допустимым потерям напряжения, термической стойкости к воздействию токов КЗ и на возгорание при протекании токов КЗ [10].

Проверка силовых кабелей на возгорание при протекании тока КЗ осуществляется из предположения, что максимальный ток, протекающий в кабеле, равен действующему значению тока короткого замыкания в начале линии [11]. В соответствии с технической политикой ПАО «Россети» проектируемые, сооружаемые и модернизируемые кабельные линии (КЛ) электропередачи должны выполняться силовым кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция). Поскольку половина производимых кабелей с СПЭ-изоляцией однофазные, то особую актуальность приобретает вопрос обеспечения режима экрана по току и перенапряжениям в случае включения кабеля в однофазном режиме.

Термическая стойкость электропроводящего экрана однофазного силового кабеля в сети 6–35 кВ с изолированной нейтралью обеспечивается, если выполняется следующее условие [11]:

$$I_{ac} \geq I_{scc}^{(2)}, \quad (1)$$

где I_{ac} – длительно допустимый ток медного экрана, кА; $I_{scc}^{(2)}$ – ток двухфазного короткого замыкания, кА;

Значения I_{ac} ограничивается сечением экрана, например:

– для кабеля 220 кВ (сечение экрана 120 мм²) – 24,36 кА;

– для кабеля 10 кВ (сечение экрана 25 мм²) – 19,2 кА.

В сетях 110–500 кВ сечение экранов однофазных кабелей выбирают на ток однофазного короткого замыкания. В обоих случаях сечение экрана получается повышенное, поэтому такие кабели в нормальном режиме работы сети требуют решения проблемы с токами и потерями мощности в экранах. Для борьбы с потерями внедряются такие мероприятия, как одностороннее заземление экранов или транспозиция экранов в трехфазном включении, что создает дополнительные проблемы при эксплуатации кабельной линии [12].

Основным назначением экрана является обеспечение равномерности электрического поля, воздействующего на главную изоляцию кабеля (изоляцию «жила–экран»), что достигается только в случае заземления экрана. Поэтому электропроводящая оболочка кабеля (экран), как правило, заземлена на его концах и в ряде промежуточных точек (муфтах или транспозиционных узлах). При этом для токов нагрузки однофазного кабеля образуется путь в земле, параллельный проводнику. В этом отношении металлическая оболочка кабеля аналогична заземленным тросам у воздушной линии. На распределение тока между оболочкой и землей существенное влияние оказывает не только собственное сопротивление оболочки (экрана), но и сопротивление ее заземлений, значения которых зависят от характера прокладки кабеля (траншея, блоки, туннель, эстакада и т.д.) и ряда других факторов.

При использовании однофазного силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена с незаземленным экраном или заземленным с одного конца для питания однофазной нагрузки значение длительно допустимого тока следует выбирать по сечению экрана, поскольку сечение экрана всегда в несколько раз меньше сечения токопроводящей жилы [13]. В однофазном режиме при заземлении экрана с двух концов ток нагрузки протекает по экрану и «земляному каналу» с сопротивлениями земли R_l и заземлителей R_g (рисунок), тогда для тока жилы кабеля \dot{I}_c и суммарного сопротивления «земляного канала» $R_{l\Sigma}$ справедливы соотношения:

$$\dot{I}_c = \dot{I}_s + \dot{I}_l; \quad R_{l\Sigma} = R_l + 2R_g, \quad (2)$$

где \dot{I}_s – ток, протекающий в жиле силового кабеля; \dot{I}_l – ток, протекающий в земле.

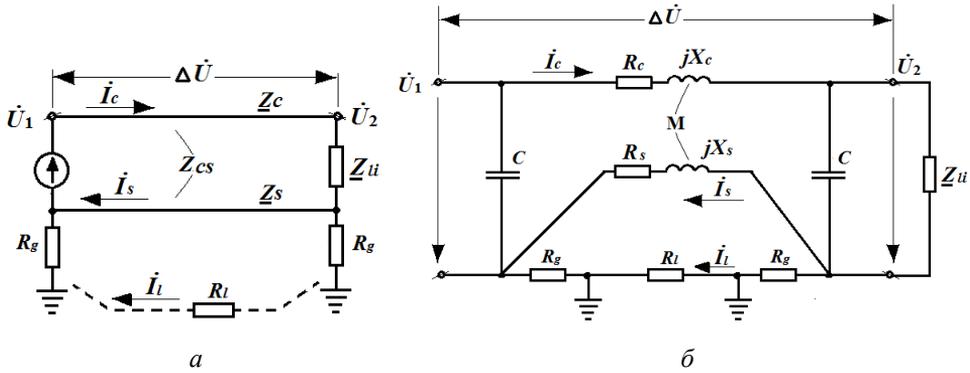


Рис. Кабельная линия с однофазным кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена: а – в однофазном включении; б – схема замещения с сопротивлениями заземлителей R_g

Однофазную КЛ, выполненную кабелем с СПЭ-изоляцией, можно смоделировать схемой замещения (см. рис. 1,б), параметры элементов которой определяются по известным соотношениям:

– погонные активные сопротивления жилы и экрана кабеля:

$R_c = R_{0c}l$, Ом; $R_{0c} = \rho/S_c$, Ом/км; $R_s = R_{0s} \cdot l$, Ом; $R_{0s} = \rho/S_s$, Ом/км, (3)
 где $\rho = 17,5 \dots 18,5$ Ом мм²/км – для электротехнической меди и $29 \dots 31,5$ Ом мм²/км – для алюминия и его сплавов; S_c , S_s – площадь поперечного сечения жилы и экрана кабеля, мм², соответственно; l – протяженность кабельной линии, км.

Значение сопротивлений заземлителей R_g для напряжений выше 1 кВ принимаем 2, 4 или 8 Ом (для подстанций до 35 кВ в зависимости от значения низшего напряжения) и менее 10 Ом для напряжений выше 110 кВ (ПУЭ). Известно [14], что для однофазного силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена значения собственной индуктивности экрана и взаимной индуктивности «жила–экран» равны и определяются по формуле:

$$L_s = M_{cs} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_L}{d}, \quad (4)$$

где D_L – эквивалентная глубина возврата тока через землю, м,

$$D_L = \left(2,085 / \sqrt{f \cdot \lambda \cdot 10^{-9}} \right) \cdot 10^{-3}; \quad d$$

– расстояние от центра токопроводящей жилы до экрана, мм; μ_0 – магнитная проницаемость, Гн/м,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$; λ – удельная проводимость земли, $(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$; f – частота напряжения питающей сети, Гц.

Индуктивность токопроводящей жилы кабеля можно определить по известной эмпирической формуле [15]:

$$L_c = \left(0,46 \lg \frac{d}{r_c} + 0,05\mu \right) \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где r_c – радиус токопроводящей жилы кабеля; μ – магнитная проницаемость материала токопроводящей жилы кабеля, Гн/м.

Токораспределение в ветвях схемы, показанной на рисунке, *a* определим, анализируя схему замещения, представленную на рисунке, *б* в которой силовой кабель концентрической (коаксиальной) структуры моделируется T-образной схемой замещения с параметрами активного и реактивного сопротивления и емкостью между токоведущей жилой и экраном. Экран моделируется продольными активным и реактивным сопротивлениями. Емкость экран–земля не учитываем из-за большой (порядка 1000 м) глубины протекания тока возврата, что также решает вопрос неучета способа прокладки силового кабеля.

Зарядную мощность кабельной линии (зарядные токи), моделируемую поперечными элементами X_c , при напряжениях 6–20 кВ можно не учитывать ввиду ее малости по сравнению с реактивной мощностью нагрузки [16]. При этом условия уравнения электрического состояния схемы на рисунке, *б* принимают вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_c(\underline{Z}_c + \underline{Z}_{li}) - \dot{I}_s\underline{Z}_m + \dot{I}_l R_{l\Sigma}, \quad (6)$$

$$0 = -\dot{I}_s\underline{Z}_s - \dot{I}_c\underline{Z}_m + \dot{I}_l R_{g\Sigma}, \quad (7)$$

где \underline{Z}_c – полное сопротивление жилы кабеля, $\underline{Z}_c = R_c + j\omega L_c$; \underline{Z}_s – полное сопротивление экрана кабеля, $\underline{Z}_s = R_s + j\omega L_s$; \underline{Z}_m – сопротивление взаимной индукции между двумя параллельными линиями «провод–земля»; \underline{Z}_{li} – полное сопротивление нагрузки; $R_{l\Sigma}$ – сопротивление «земляного канала» с учетом заземлителей, $R_{l\Sigma} = R'_l + 2R_g = R_l \cdot l + 2R_g$, Ом.

Для КЛ напряжением 110 кВ и выше уравнения электрического состояния уравнения электрического состояния схемы замещения на рисунке, *б* принимают вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_c\underline{Z}_c - \dot{I}_s\underline{Z}_m + \dot{I}_l R_{l\Sigma} + \dot{U}_2, \quad (8)$$

$$0 = -\dot{I}_s\underline{Z}_s - \dot{I}_c\underline{Z}_m + \dot{I}_l R_{l\Sigma}, \quad (9)$$

где

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_c \cdot \frac{[Z_{li} \cdot (-0,5jX_c)]}{[Z_{li} - 0,5jX_c]} \quad (10)$$

Падение напряжения на токопроводящей жиле, «земле» и экране кабеля с учетом принятых на рисунке, б условных положительных направлений токов и напряжений:

$$\Delta \dot{U}_c = \dot{I}_c R_c + j\dot{I}_c X_c - j\dot{I}_s X_{cs}, \quad (11)$$

$$\Delta \dot{U}_s = \dot{I}_s R_s + j\dot{I}_s X_s - j\dot{I}_c X_{cs} = \dot{I}_c R_c - \dot{I}_l (R_s - jX_m), \quad (12)$$

$$\Delta \dot{U}_l = \dot{I}_l R_{l\Sigma} = \dot{I}_l \cdot (R'_l + 2R_g). \quad (13)$$

С учетом изложенного выражение падения напряжения на экране кабеля, при условии равенства реактивных сопротивлений экрана и взаимоиндукции $X_s = X_{cs} = X_m$, принимает вид:

$$\Delta \dot{U}_s = \dot{I}_s R_s + jX_m(\dot{I}_s - \dot{I}_c) = \dot{I}_c R_s - \dot{I}_l (R_s - jX_m) = \dot{I}_s R_s + jX_m \dot{I}_l. \quad (14)$$

Поскольку для параллельно включенных ветвей (см. рисунок, 1, б) выполняется условие $\Delta U_s = \Delta \dot{U}_l$, то из равенства

$$\dot{I}_c R_s - \dot{I}_l (R_s - jX_m) = \dot{I}_l (R'_l + 2R_g) \quad (15)$$

получим выражение для расчета тока в «земляном канале»:

$$\dot{I}_l = \dot{I}_c \frac{R_s}{R_s + R'_l + 2R_g - jX_m} = \dot{I}_c \cdot \dot{k}, \quad (16)$$

где

$$\dot{k} = \frac{R_s}{R_s + R'_l + 2R_g - jX_m} = \frac{R_s}{\sqrt{(R_s + R_{l\Sigma})^2 + X_m^2}} e^{j\varphi_k} = |k| e^{j\varphi_k}. \quad (17)$$

Тогда выражения для токов «земли» и экрана, заземленного с двух концов, можно представить в виде:

$$\dot{I}_l = I_c |k| e^{j(\varphi_{ic} + \varphi_k)} = I_l e^{j\varphi_{il}}.$$

$$\dot{I}_s = \dot{I}_c - \dot{I}_l = \dot{I}_c (1 - \dot{k}) = I_c e^{j\varphi_{ic}} \left(1 - \frac{R_s}{\sqrt{(R_s + R_{l\Sigma})^2 + X_m^2}} e^{j\varphi_k} \right). \quad (18)$$

Значения модуля $|k|$ для различных марок кабеля при длине кабельной линии в 1 км приведено в табл. 1. Полученные значения можно использовать для вычисления тока «земли» и экрана без вычисления фазовых сдвигов.

Таблица 1

Расчетные значения модуля и аргумента тока «земли»

Марка кабеля	Ток жилы, I_c , А	Сопротивления заземлителей, R_g , Ом	Значения модуля $ k $ при $l = 1$ км, отн. ед.	Ток «земли», I_l , А	Ток «земли», в процентах тока жилы, %	Фаза тока «земли», эл. градус
ПвПнг(А)-НФ-10-70(16)	120	2 (4)	0,215 (0,122)	25,83 / 15	21,5 / 12,5	8,05° / 4,56°
ПвПнг(А)-НФ-10-150(25)	140	2 (4)	0,149 (0,082)	20,9 / 11,45	14,9 / 8,17	8,94° / 4,67°
ПвПнг(А)-НФ-10-300(35)	170	2(4)	0,151 (0,0598)	15,6 / 10,17	11,1 / 5,98	8,55° / 4,67°

Таким образом, ток в «земляном канале» при заземлении экрана однофазного кабеля с обеих концов, при использовании конкретной марки кабеля с СПЭ-изоляцией, можно определить по известному току жилы и по активным сопротивлениям экрана, заземлителей, земли и реактивному сопротивлению индуктивности экрана. При этом предельно допустимый ток жилы следует приравнять предельно допустимому току экрана.

Потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока характеризуются дополнительным сопротивлением R_l , определяемым по приближенному соотношению, Ом/км

$$R_l = \pi^2 f \cdot 10^{-4}. \quad (19)$$

На промышленной частоте $f = 50$ Гц удельное сопротивление земли R_z равно 0,05 Ом/км, что свидетельствует о практическом постоянстве потерь активной мощности в земле при заданной частоте. Сечение экрана однофазного силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 6–35 кВ выполняется от 16 до 35 мм², при этом погонное активное сопротивление медного экрана изменяется в диапазоне от 1,125 до 0,5143 Ом/км.

С учетом значения удельного (километрического) сопротивления «земли» по приближенным оценкам, равному 0,05 Ом/км, убеждаемся, что в этом случае ток в земляном канале значительно меньше тока жилы кабеля и составляет единицы процентов от тока жилы. В качестве примера в табл. 2 приведены результаты расчета тока в земляном канале для кабеля марки ПвПнг(А)-НФ-10 с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ с сечением экрана 16, 25 и 35 мм². При расчете длительно допустимый ток жилы принят равным длительно допустимому току экрана заданного сечения [17–21].

Таблица 2

Расчетные значения тока «земли» в долях тока жилы кабеля

Марка кабеля	Активное сопротивление экрана, R_{0s} , Ом/км	Ток жилы I_c , А	Ток экрана I_s , А	Размер d , мм	Индуктивность экрана L_s , Гн/км	Сопротивление взаимной индукции X_m , Ом/км	Протяженность кабельной линии l , км	Сопротивление заземлителей R_g , Ом	Ток «земли» I_l , А
ПвПнг(А)-HF-10-70(16)	1,125	120	120	8,12	$23,308 \cdot 10^{-4}$	0,732239	1,0	4 (2)	15/25,83
ПвПнг(А)-HF-10-150(25)	0,72	140	140	10,39	$22,83 \cdot 10^{-4}$	0,7172	1,0	4 (2)	11,45/20,9
ПвПнг(А)-HF-10-300(35)	0,5143	170	170	13,172	$22,34 \cdot 10^{-4}$	0,7018	1,0	4 (2)	10,17/15,6

Расчетные значения действующего значения тока «земли» и его начальной фазы в функции тока жилы и сопротивления заземлителей приведены в табл. 1. Наличие реактивного сопротивления взаимной индукции вносит дополнительный фазовый сдвиг тока «земли», что в конечном итоге приводит к изменению коэффициента мощности линии. Например, при сечении экрана кабеля в 16 мм^2 и значении сопротивления заземлителя 8 Ом вектор тока «земли» будет повернут примерно на 5 электрических градусов относительно вектора тока жилы.

$$I_l = I_c \frac{R_s}{R_s + R_l + 2R_g - jX_m} = I_c \frac{1,125}{1,125 + 0,05 + 8 - j0,732} = 0,125 I_c e^{j4,56^\circ}. \quad (20)$$

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что с увеличением сечения экрана ток «земляного канала» уменьшается пропорционально, но абсолютное значение этого тока существенно зависит от сопротивления заземлителя. Следует отметить, что начальная фаза тока «земли» при указанном сопротивлении заземлителей практически не зависит от сечения экрана, что свидетельствует о постоянстве фазы тока в экране. Если начальную фазу тока жилы принять равной нулю, то с учетом фазы тока «земли» фаза тока в экране составит несколько электрических градусов. Поэтому в инженерных расчетах однофазных кабельных линий с СПЭ-изоляцией фазовые сдвиги токов экрана и «земли» можно не учитывать.

При определении потерь активной мощности в кабельных линиях с изоляцией из сшитого полиэтилена с двухсторонним заземлением экрана можно не учитывать потери в изоляции из-за малого значения угла диэлектрических потерь. Потери активной мощности в жиле, «земле» и экране однофазной кабельной линии с двухсторонним заземлением экрана определяется по формуле:

$$\Delta P_{1c} = I_c^2 R_c + I_s^2 R_s + I_l^2 R_{l\Omega}. \quad (21)$$

При равенстве токов жилы и экрана однофазного кабеля и с учетом выражения для тока «земли» получим соотношение для расчета суммарных потерь активной мощности, распределение которой по участкам кабельной линии при предельном токе экрана приведено в табл. 3:

$$\Delta P_{1c} = I_c^2 (R_c + R_s + |k|^2 R_{\Sigma}). \quad (22)$$

Таблица 3

Потери мощности в кабельной линии электропередачи при $R_{33} = 2 \text{ Ом}$

Марка кабеля	Протяженность кабельной линии l , км	Удельное активное сопротивление жилы R_{0c} , Ом/км	Удельное активное сопротивление экрана R_{0s} , Ом/км	Суммарное сопротивление «земли» R_{Σ} , Ом	Потери активной мощности		
					Жила, кВт	Экран, кВт	«Земля», кВт
ПвПнг(А)-НФ-10-70(16)	1,0	0,2571	1,125	4,05	3,703	16,2	2,696
ПвПнг(А)-НФ-10-150(25)	1,0	0,12	0,72	4,05	1,728	10,368	1,7623
ПвПнг(А)-НФ-10-300(35)	1,0	0,06	0,5143	4,05	0,864	7,405	2,669

При одностороннем заземлении кабеля (например, со стороны источника питания) перенапряжение на экране, с учетом равенства токов жилы и экрана, можно рассчитать по соотношению:

$$\Delta \dot{U}_s = \dot{I}_c R_s + j \dot{I}_c X_s - j \dot{I}_c X_{cs} = \dot{I}_c (R_c + R_s - j X_M). \quad (23)$$

Значение реактивного сопротивления взаимной индукции кабеля с СПЗ-изоляцией, как это следует из табл. 2, слабо зависит от сечения жилы и экрана кабеля, потому максимальное значение напряжения экран–земля в конце линии будет наблюдаться для кабелей с минимальным сечением экрана. Например, для кабеля ПвПнг(А)-НФ-10-70(16) из выражения (23) с учетом данных табл. 2 получим:

$$\Delta \dot{U}_s = 187,698 e^{j27,9^\circ} \text{ В}, \quad (24)$$

что свидетельствует о наличии опасных для обслуживающего персонала перенапряжений при разземлении экрана кабеля.

Выводы. С учетом изложенного можно сделать вывод, что выполнение однофазной двухпроводной линии электропередачи с проводами разного сечения вследствие увеличения потерь электроэнергии нецелесообразно, поскольку при использовании однофазного кабеля с СПЭ-изоляцией для передачи электроэнергии в однофазной сети ухудшаются показатели энергоэффективности и энергосбережения. Кроме того, заземление экрана кабеля с СПЭ-изоляцией во избежание появления опасных перенапряжений необходимо обязательно выполнять с двух концов линии. Правильным будет решение о построении однофазной кабельной линии

в системах электроснабжения промышленных предприятий двумя кабелями с СПЭ-изоляцией, в которой можно проводить ряд мероприятий по оптимизации потерь электроэнергии. При этом критериями выбора будут надежность, энергоэффективность и экономичность.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-46-330198 р_а.

Библиографический список

1. Распределительные сети [Электронный ресурс] // Кабель-news. – 2008. – № 10. – С. 39–43. – URL: http://www.kabelnews.ru/netcat_files/90/100/oktober08_MRSK_Severo_Zapada.pdf (дата обращения: 01.02.2019).
2. Лавров Ю.А. Преимущества и недостатки изоляции из сшитого полиэтилена [Электронный ресурс]. – URL: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=6734 (дата обращения: 01.02.2019).
3. Положение ПАО «Россети» о «Единой технической политике в электросетевом комплексе» (утв. Советом директоров ПАО МРСК Центра и Приволжья (пр. от 30.03.2017 № 262)). – М., 2017. – 195 с.
4. ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009). Напряжения стандартные // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
5. Правила устройства электроустановок. – 7-е и изд. – СПб.: ДЕАН, 2013. – 1168 с.
6. Polyakov D.A., Koshchuk G.A., Nikitin K.I. Definition of the remaining life of power-transmission lines with cross-linked polyethylene insulation // Russian Electrical Engineering. – 2017. – № 5(88). – С. 271–273.
7. Bure I.G., Khevsuriani I.M., Bystrov A.V. Influence of the shield grounding system on choice of section // Russian Electrical Engineering. – 2016. – № 11(87). – С. 641–646.
8. Дмитриев М. Особенности применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Электроэнергия. – 2015. – № 3(30). – С. 62–67.
9. ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта электродинамического и термического действия токов короткого замыкания // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
10. Influence of partial air pressure on propagation and partial discharge characteristics of electrical trees in XLPE cable under different temperatures / L. Zhou, Q. Qiu, Y. Chen, D. Liu, L. Zhang, R. Cheng // Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao. – 2016. – № 18(36). – P. 5094–5102.

11. Циркуляр Ц02-98 (Э) «О проверке кабелей на невозгорание при протекании тока короткого замыкания» // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

12. The possibilities offered by use of solid insulation in complete switching gears and cross-linked polyethylene insulation under direct and alternating current / R.N. Shul'ga, A.R. Shul'ga, D.I. Kovalev, G.Z. Mirzabekyan, V.N. Varivodov // Russian Electrical Engineering. – 2016. – № 8(87). – P. 462–466.

13. Research of Electro-Thermal Aging Process of Cross-Linked Polyethylene / D.A. Polyakov, K.I. Nikitin, A.N. Novozhilov, M.Ya. Kletsel // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1050. – P. 012061-1–012061-6. DOI :10.1088/1742-6596/1050/1/012061

14. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. – СПб.: НИВА, 2008. – 104 с.

15. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие. – 3-е изд. перераб. – М.: КНОРУС, 2012. – 648 с.

16. Trufanova N.M., Dyatlov I.Ya. Determination of the optimal working conditions of cable lines in an underground cable channel // Russian Electrical Engineering. – 2016. – № 11(87). – P. 597–600.

17. ГОСТ 55025-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на напряжение 6–35 кВ включительно. Общие технические условия // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

18. МЭК 60502-2-2014. Кабели силовые с экструдированной изоляцией и кабельная арматура на номинальное напряжение от 1 кВ ($U_m = 1,2$ кВ) до 30 кВ ($U_m = 36$ кВ) включительно // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

19. HD 620 S2-2010. Кабели для распределительных сетей с экструдированной изоляцией на номинальное напряжение от 3,6/6 (7,2) кВ до 20,8/36 (42) кВ включительно // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

20. Мещанов, Г.И. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 и 20 кВ с токопроводящими жилами секторной формы // Энергия единой сети. – 2016. – № 4(27). – С. 58–66.

21. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 352 с.

References

1. Raspredelitel'nye seti [Distribution network]. *Kabel'-news*, 2008, no. 10, pp. 39-43, available at: http://www.kabel-news.ru/netcat_files/90/100/oktober08_MRSK_Severo_Zapada.pdf (accessed 01 February 2019).
2. Lavrov Iu.A. Preimushchestva i nedostatki izoliatsii iz sshitogo polietilena [Advantages and disadvantages of cross-linked polyethylene insulation], available at: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=6734 (accessed 01 February 2019).
3. Polozhenie PAO "Rosseti" o "Edinoi tekhnicheskoi politike v elektrosetevom komplekse". Utverzhdeno Sovetom direktorov PAO MRSK Tsentra i Privolzh'ia (pr. ot 30.03.2017 № 262) [The position of the OJSC "Rosseti" on the Unified technical policy in electric grid complex]. Moscow, 2017. 195 p.
4. GOST 29322-2014 (IEC 60038:2009). Napriazheniia standartnye [Standard voltages]. Dostup iz spravочно-pravovoi sistemy Konsul'tantPlus.
5. Pravila ustroistva elektroustanovok [Electrical installation rules]. 7nd ed. Saint Petersburg: DEAN, 2013. 1168 p.
6. Polyakov D.A., Koshchuk G.A., Nikitin K.I. Definition of the remaining life of power-transmission lines with cross-linked polyethylene insulation. *Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 5(88), pp. 271-273.
7. Bure I.G., Khevsuriani I.M., Bystrov A.V. Influence of the shield grounding system on choice of section. *Russian Electrical Engineering*, 2016, no. 11(87), pp. 641-646.
8. Dmitriev M. Osobennosti primeneniia kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena [Features of application of cables with insulation made of cross-linked polyethylene]. *Elektroenergiia*, 2015, no. 3(30), pp. 62-67.
9. GOST R 52736-2007 Korotkie zamykaniia v elektroustanovkakh. Metody rascheta elektrodinamicheskogo i termicheskogo deistviia tokov korotkogo zamykaniia [Short circuits in electrical installations. Methods of calculation of electrodynamic and thermal action of short-circuit currents]. Dostup iz spravочно-pravovoi sistemy Konsul'tantPlus.
10. Zhou L., Qiu Q., Chen Y., Liu D., Zhang L., Cheng R. Influence of partial air pressure on propagation and partial discharge characteristics of electrical trees in XLPE cable under different temperatures. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao*, 2016, no. 18(36), pp. 5094-5102.
11. Tsirkuliar Ts02-98 (E) "O proverke kabelei na nevozgoranie pri protekanii toka korotkogo zamykaniia" [On checking the cables on

newsorange during the flow of short circuit current]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

12. Shul'ga R.N., Shul'ga A.R., Kovalev D.I., Mirzabekyan G.Z., Varivodov V.N. The possibilities offered by use of solid insulation in complete switching gears and cross-linked polyethylene insulation under direct and alternating current. *Russian Electrical Engineering*, 2016, no. 8(87), pp. 462-466.

13. Polyakov D.A., Nikitin K.I., Novozhilov A.N., Kletsel M.Ya. Research of Electro-Thermal Aging Process of Cross-Linked Polyethylene. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1050, pp. 012061-1-012061-6. DOI:10.1088/1742-6596/1050/1/012061

14. Dmitriev M.V. Zazemlenie ekranov odnofaznykh silovykh kabelei 6-500 kV [Grounding screens of single-phase power cables 6-500 kV]. Saint Petersburg: NIVA, 2008. 104 p.

15. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Peredacha i raspredelenie elektricheskoi energii [Transmission and distribution of electrical energy]. Moscow: KNORUS, 2012. 648 p.

16. Trufanova N.M., Dyatlov I.Ya. Determination of the optimal working conditions of cable lines in an underground cable channel. *Russian Electrical Engineering*, 2016, no. 11(87), pp. 597-600.

17. GOST 55025-2012. Kabeli silovye s plastmassovoi izoliatsiei na napriazhenie 6-35 kV vkluchitel'no. Obshchie tekhnicheskie usloviia [Power cables with plastic insulation for voltage 6-35 kV inclusive. General specifications]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

18. MEK 60502-2-2014. Kabeli silovye s ekstrudirovannoi izoliatsiei i kabel'naia armatura na nominal'noe napriazhenie ot 1 kV ($U_m=1,2$ kV) do 30 kV ($U_m=36$ kV) vkluchitel'no [Power cables with extruded insulation and cable fittings for rated voltage from 1 kV ($U_m=1.2$ kV) to 30 kV ($U_m=36$ kV) inclusive]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

19. HD 620 S2-2010. Kabeli dlia raspredelitel'nykh setei s ekstrudirovannoi izoliatsiei na nominal'noe napriazhenie ot 3,6/6 (7,2) kV do 20,8/36 (42) kV vkluchitel'no [Cables for distribution networks with extruded insulation at rated voltage from 3,6/6 (7,2) kV to 20,8/36 (42) kV inclusive]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

20. Meshchanov, G.I. Kabeli s izoliatsiei iz sshitogo polietilena na napriazhenie 10 i 20 kV s tokoprovodiashchimi zhilami sektornoi formy [Cables with cross-linked polyethylene insulation for 10 and 20 kV voltage with sector-shaped conductive conductors]. *Energiia edinoi seti*, 2016, no. 4(27), pp. 58-66.

21. Spravochnik po proektirovaniuu elektricheskikh setei [Handbook of electrical network design]. 2nd ed. Ed. D.L. Faibisovicha. Moscow: NTs ENAS, 2006. 352 p.

Сведения об авторах

Бадалян Норайр Петикович (Владимир, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электроэнергетика» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Владимир, ул. Горького, 87, e-mail: norayrbadalyan@mail.ru).

Колесник Григорий Платонович (Владимир, Россия) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электротехника и электроэнергетика» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Владимир, ул. Горького, 87, e-mail: norayrbadalyan@mail.ru).

Чащин Евгений Анатольевич (Ковров, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника» Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева (601910, Владимирская обл., Ковров, ул. Маяковского, 19, e-mail: kanircha@list.ru).

About the authors

Badalyan Norayr Petikovich (Vladimir, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor Department of electrical engineering and electric power industry Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (600000, Vladimir, 87, Gorkogo str., e-mail: norayrbadalyan@mail.ru).

Kolesnik Grigory Platonovich (Vladimir, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of electrical engineering and electric power industry Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (600000, Vladimir, 87, Gorkogo str., e-mail: norayrbadalyan@mail.ru).

Chashchin Evgeny Anatolyevich (Kovrov, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of electrical engineering Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyareva (601910, Kovrov, 19, Mayakovskogo str., e-mail: kanircha@list.ru).

Получено 15.04.2019