

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-321-333>

УДК 621.311.1.016

## Определение индуктивных сопротивлений одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением до 1 кВ

В. Н. Радкевич<sup>1)</sup>, В. В. Сталович<sup>1)</sup>, Д. С. Алехнович<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Для расчета токов короткого замыкания, потерь напряжения и реактивной мощности в электрических сетях необходима информация об индуктивных сопротивлениях кабельных линий. В технической литературе отсутствуют точные параметры одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением до 1 кВ. Это приводит к неточностям в расчетах режимов электрических сетей. В статье рассматриваются вопросы определения индуктивности и индуктивного сопротивления линий электропередачи напряжением до 1 кВ, выполненных одножильными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Произведен анализ формул для определения индуктивности, приводимых в разных литературных источниках, который показал существенное различие численных значений получаемых результатов расчета. Выявлена формула, обеспечивающая более достоверные расчеты индуктивности кабельных линий. Определено влияние на индуктивное сопротивление допустимого увеличения толщины изоляции и оболочки одножильного кабеля напряжением до 1 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Произведены расчеты индуктивности и индуктивного сопротивления одножильных кабелей при раскладке их по вершинам равнобедренного и прямоугольного треугольников, а также в одной плоскости. Показано, что при расположении в плоскости с расстоянием между соседними кабелями, равным наружному диаметру кабеля, удельные индуктивности и индуктивные сопротивления в 1,7–1,8 раза больше, чем при расположении вплотную по треугольнику. При больших сечениях токопроводящих жил и в многоамперных установках имеют место поверхностный эффект и эффект близости, вследствие которых снижаются напряженность магнитного поля внутри жилы и ее индуктивность. Определены индуктивности и индуктивные сопротивления одножильных кабелей напряжением до 1 кВ с учетом влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. Расчеты показали, что неучет указанных эффектов приводит к существенным погрешностям в определении индуктивных сопротивлений. Рассмотрено влияние на индуктивные сопротивления одножильных кабелей брони, выполненной из стальных лент. На иллюстративном примере показано, что индуктивное сопротивление бронированного кабеля с площадью сечения токопроводящей жилы 800 мм<sup>2</sup> примерно в два раза больше, чем небронированного. Применение в трехфазных электрических сетях одножильных кабелей, бронированных стальными лентами, должно быть запрещено нормативными документами, поскольку такие кабели резко ухудшают эффективность систем электроснабжения.

**Ключевые слова:** кабельные линии, электрические сети, одножильные кабели, индуктивность, индуктивное сопротивление, раскладка кабелей, поверхностный эффект, эффект близости, бронированный кабель

**Для цитирования:** Радкевич, В. Н. Определение индуктивных сопротивлений одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением до 1 кВ / В. Н. Радкевич, В. В. Сталович, Д. С. Алехнович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 4. С. 321–333. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-321-333>

### Адрес для переписки

Радкевич Владимир Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-65-52  
[epp@bntu.by](mailto:epp@bntu.by)

### Address for correspondence

Radkevich Vladimir N.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-65-52  
[epp@bntu.by](mailto:epp@bntu.by)

## Towards Determination of Inductive Resistances of Single-Core Cables with Voltage of up to 1 kV Insulated by Cross-Linked Polyethylene

V. N. Radkevich<sup>1)</sup>, V. V. Stalovich<sup>1)</sup>, D. S. Alekhovich<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** To calculate short-circuit currents, voltage losses and reactive power in electrical networks, information on inductive resistances of cable lines is required. In the technical literature there are no exact parameters of single-core cables with voltage of up to 1 kV insulated by cross-linked polyethylene. This results in inaccuracies in the calculations of modes of electrical networks. The article considers the issues of determining the inductance and inductive resistance of power lines up with voltage of up to 1 kV made of single-core cables and insulated by cross-linked polyethylene. The analysis of formulas for determining the inductance given in different literature sources was fulfilled, that demonstrated a significant difference in the numerical values of the obtained calculation results. The formula that provides more reliable calculations of the inductance of the cable lines was identified. The influence of the permissible increase in the thickness of the insulation and the sheath of a single-core cable with voltage of up to 1 kV covered with cross-linked polyethylene on the inductive resistance was determined. The inductance and inductive resistance of single-core cables were calculated when the cables were arranged along the vertices of an equilateral and right-angle triangle, as well as in one plane. It was shown that the specific inductances and inductive resistances are 1.7–1.8 times greater in the plane with the distance between adjacent cables equal to the outer diameter of the cable than in the location is close to the triangle. When the cross sections of conductive cores are large and installations are multi-ampere, there is a surface effect and proximity effect, due to which the magnetic field intensity inside the core and its inductance decrease. Inductivities and inductive resistances of single-core cables with voltage up to 1 kV were determined taking into account the influence of the surface effect and the proximity effect. The calculations that we performed have shown that the non-consideration of the above-mentioned effects leads to significant errors in the determination of inductive resistances. The influence of one-core cables of armor made of steel tapes on inductive resistances is considered. An illustrative example shows that the inductive resistance of an armored cable with a cross-section area of the current-conducting core equal to 800 mm<sup>2</sup> is about twice as large as the unarmored one. The use of single-core cables in three-phase electrical networks, armored with steel straps, ought to be prohibited by regulatory documents, since such cables dramatically worsen the efficiency of power supply systems.

**Keywords:** cable lines, electrical networks, single-core cables, inductance, inductive resistance, cable layout, surface effect, proximity effect, armored cable

**For citation:** Radkevich V. N., Stalovich V. V., Alekhovich D. S. (2018) Towards Determination of Inductive Resistances of Single-Core Cables with Voltage of up to 1 kV Insulated by Cross-Linked Polyethylene. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (4) 321–333. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-321-333> (in Russian)

### Введение

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), имеющие ряд преимуществ по сравнению с кабелями с бумажной пропитанной изоляцией, начиная с 80-х гг. XX в. применяются в электрических сетях энергосистем и промышленных предприятий Республики Беларусь и других стран СНГ [1, 2]. В системах электроснабжения (СЭС) напряжением до 1 кВ

используются как многожильные (трех-, четырех- или пятижильные), так и одножильные кабели с изоляцией из СПЭ [3]. Трехфазная линия электропередачи, выполненная многожильным кабелем, компактнее, проще в монтаже и требует меньших затрат на сооружение и эксплуатацию. Поэтому в электрических сетях напряжением до 1 кВ в большинстве случаев применяются многожильные кабели. Однако такие кабели имеют площадь сечения токопроводящих жил (ТПЖ) до 240 мм<sup>2</sup>, что ограничивает пропускную способность линий электропередачи.

Предельные значения длительных допустимых токов четырехжильных кабелей с алюминиевыми ТПЖ при нормированных условиях прокладки достигают примерно 400 А при прокладке в воздухе и 370 А – в земле. При расчетных токах линий в несколько сот ампер в трехфазных сетях напряжением до 1 кВ возможно применение одножильных кабелей с большими допустимыми токами. Согласно стандарту [4], одножильные кабели с изоляцией из СПЭ могут иметь площадь сечения ТПЖ до 1000 мм<sup>2</sup>. Их длительные допустимые токи достигают порядка 1450 А при прокладке в воздухе и 1000 А – в земле. Поэтому использование одножильных кабелей в СЭС в ряде случаев позволяет отказаться от применения трансформаторной подстанции напряжением 10 (6)/0,4 (0,69) кВ для электроснабжения удаленного обособленного объекта. Такие кабели обеспечивают высокую пропускную способность линии электропередачи.

Для расчетов токов короткого замыкания (КЗ), потерь мощности и напряжения в электрических сетях переменного тока необходимо знать активные и индуктивные сопротивления линий электропередачи. Однако нормативно-техническая документация с точными параметрами кабелей с изоляцией из СПЭ отсутствует. Приводимые в технической литературе данные не учитывают особенностей конструктивного исполнения кабелей и линий электропередачи, что может приводить к недопустимым погрешностям в электрических расчетах. Для одножильных кабелей напряжением до 1 кВ в доступной для проектировщиков литературе информация, необходимая для определения сопротивлений, вообще отсутствует. И если активные сопротивления можно принять по справочным данным, приводимым для кабелей напряжением 6–10 кВ, то этого нельзя сделать для индуктивных сопротивлений, значения которых зависят от конструкции кабелей.

В трехфазных электрических сетях, выполненных одножильными кабелями, на величину индуктивного сопротивления линии большое влияние оказывает принятая схема расположения кабелей относительно друг друга при прокладке. Несимметричное расположение кабелей из-за электромагнитных явлений в большей степени оказывает влияние на их индуктивные и активные сопротивления по сравнению с симметричной раскладкой, что не всегда учитывается. Поэтому расчеты режимов сетей напряжением до 1 кВ, выполненных одножильными кабелями, из-за неточностей в определении индуктивных сопротивлений кабелей могут иметь невысокую достоверность.

В статье рассматриваются методы определения индуктивных сопротивлений кабельных линий, выполненных одножильными кабелями с изоляцией из СПЭ, и факторы, влияющие на их значения.

### Конструктивные параметры одножильных кабелей напряжением до 1 кВ

В трехфазных электрических сетях напряжением до 1 кВ могут применяться небронированные одножильные кабели с пластмассовой изоляцией. В соответствии с [4] кабель имеет многопроволочную круглую ТПЖ из алюминия или меди с фазной изоляцией из СПЭ и оболочку из полиэтилена или поливинилхлоридного пластиката. Диаметр жилы  $d$ , наружный диаметр кабеля  $D$ , толщина изоляции  $\delta_{\text{и}}$  и оболочки  $\delta_{\text{о}}$  указываются в технических условиях на кабели конкретных марок.

Расчетный диаметр кабеля можно представить как

$$D = d + 2(\delta_{\text{и}} + \delta_{\text{о}}). \quad (1)$$

Для кабелей с изоляцией из СПЭ установлены номинальные значения толщины изоляции  $\delta_{\text{ин}}$  и оболочки  $\delta_{\text{он}}$  [4].

Основные технические характеристики одножильных небронированных кабелей с изоляцией из СПЭ напряжением 1 кВ приведены в табл. 1. Значения толщины  $\delta_{\text{ин}}$  и  $\delta_{\text{он}}$  приняты в соответствии с [4], а диаметр ТПЖ – по данным, приведенным в [5].

Таблица 1

#### Технические характеристики одножильных кабелей

##### Specifications of single-core cables

Площадь сечения токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Диаметр токопроводящей жилы, мм	Номинальная толщина, мм		Расчетный диаметр кабеля, мм
		$\delta_{\text{ин}}$	$\delta_{\text{он}}$	
185	16,2	1,6	1,4	22,2
240	18,4	1,7	1,4	24,6
300	21,0	1,8	1,4	27,4
400	23,8	2,0	1,4	30,6
500	26,6	2,2	1,4	33,8
630	29,8	2,6	1,4	37,8
800	34,2	2,6	1,4	42,2

Допускается уменьшение толщины фазной изоляции кабеля на величину  $\Delta_{\text{и}}$  и толщины оболочки на  $\Delta_{\text{о}}$ , значения которых (мм) определяются по следующим выражениям [4]:

$$\Delta_{\text{и}} = 0,1 + 0,1\delta_{\text{ин}}; \quad (2)$$

$$\Delta_{\text{о}} = 0,1 + 0,15\delta_{\text{он}}. \quad (3)$$

Следует отметить, что максимальные значения  $\delta_{и}$  и  $\delta_{о}$  не нормируются [4]. Таким образом, производители могут выпускать кабели с увеличенным значением данных показателей. В этом случае кабели в процессе эксплуатации будут иметь повышенное индуктивное сопротивление.

В электрических сетях с глухозаземленной нейтралью трехфазная линия напряжением до 1 кВ, выполненная одножильными кабелями, представляет собой систему из трех фазных, нулевого рабочего  $N$  и защитного  $PE$  изолированных проводников. Допускается вместо проводников  $N$  и  $PE$  применять совмещенный нулевой проводник  $PEN$ . Наиболее распространенные способы раскладки одножильных кабелей трех фаз без учета нулевых проводников, так как они не оказывают существенного влияния на индуктивные сопротивления линии, показаны на рис. 1.

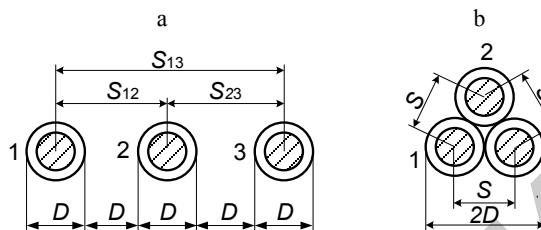


Рис. 1. Расположение одножильных кабелей 1–3 при прокладке:  
а – в одной плоскости; б – по вершинам равностороннего треугольника

Fig. 1. Location of single-core cables 1–3 when laying:  
a – in one plane; b – at the vertices of an equilateral triangle

В [6] рекомендуется применять раскладку одножильных кабелей напряжением до 1 кВ по схеме, показанной на рис. 1а, для которой в литературных источниках отсутствует какая-либо информация по их техническим характеристикам. Более удобной для монтажа линии является прокладка кабелей вплотную по вершинам треугольника (рис. 1б). В этом случае образуется симметричная система проводников, в которой сопротивления ТПЖ кабелей будут одинаковыми. Для такой раскладки в [4] приводятся длительные допустимые по нагреву токи кабелей.

#### Анализ формул для определения удельных индуктивностей одножильных кабелей

При переменном токе вокруг проводников создается переменное магнитное поле, вследствие чего линия обладает индуктивным сопротивлением. Индуктивное сопротивление одной фазы линии рассчитывается по выражению

$$X = x_0 l, \quad (4)$$

где  $x_0$  – погонное индуктивное сопротивление жилы кабеля, Ом/км;  
 $l$  – длина линии, км.

Значение  $x_0$  для кабельной линии определяется по формуле

$$x_0 = 2\pi f L_0 \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где  $f$  – частота тока, Гц;  $L_0$  – удельная индуктивность кабеля, мГн/км.

Для многожильного кабеля любого напряжения с симметричным расположением жил или трех одножильных небронированных кабелей, размещенных вплотную друг к другу по треугольнику, удельную индуктивность цепи, Гн/м, можно рассчитать по формуле [7]

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2S}{d} + \frac{1}{4} \right), \quad (6)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $S$  – расстояние между центрами жил соседних кабелей, мм;  $d$  – диаметр ТПЖ кабеля, мм.

Подставив численное значение  $\mu_0$  в (6) и выполнив преобразования, получим следующее выражение для расчета  $L_0$ :

$$L_0 = 0,2 \ln \frac{2S}{d} + 0,05. \quad (7)$$

Аналогичная формула приводится в [8] для расчета  $L_0$  при расположении одножильных кабелей треугольником.

Существуют и другие математические выражения для определения индуктивности кабелей. Например, в [9] для расчета значения  $L_0$ , мГн/км, предлагается уравнение

$$L_0 = 0,1 + 0,2 \ln \left( \frac{S-r}{r} \right), \quad (8)$$

где  $r$  – радиус ТПЖ, мм.

Согласно [10], индуктивность трех одножильных кабелей, расположенных по вершинам равностороннего треугольника, выраженная в мГн/км, вычисляется по формуле

$$L_0 = 0,05 + 0,46 \lg \left( \frac{S-r}{r} \right). \quad (9)$$

Расчеты для одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ (табл. 1) показали, что найденные по (7)–(9) значения  $L_0$  существенно различаются. Полученная по выражению (8) величина  $L_0$  на 20–24 % меньше, чем вычисленная по (7). Еще большее различие между значениями  $L_0$ , полученными по (9) и (7): по формуле (9) – на 36–45 % меньше.

При этом вычисления  $L_0$  по (7), выполненные для одножильных кабелей напряжением более 1 кВ, дали результаты, достаточно близкие к спра-

вочным данным, приведенным в [5]. Поэтому далее в статье для оценки индуктивности кабелей используется формула (7) [7, 8].

В случае несимметричной конструкции кабельной линии, например при расположении одножильных кабелей по схеме, показанной на рис. 1а, индуктивности жил и их индуктивные сопротивления будут неодинаковыми. Здесь проявляется эффект индуктивного переноса мощности, приводящий к неодинаковым взаимным индуктивностям между различными парами фаз. Из-за сложности их определения расчет сопротивлений кабельных сетей выполняют по средней удельной индуктивности, которую находят по формуле (7) с использованием среднегеометрического расстояния между центрами жил кабелей  $S_c$  [7]

$$L_0 = 0,2 \ln \frac{2S_c}{d} + 0,05. \quad (10)$$

Значение  $S_c$  может быть вычислено по формуле

$$S_c = \sqrt[3]{S_{12}S_{23}S_{13}}, \quad (11)$$

где  $S_{12}$ ,  $S_{23}$ ,  $S_{13}$  – соответственно расстояние между центрами жил кабелей 1 и 2, 2 и 3, 1 и 3.

Обозначив буквой  $S$  расстояние между центрами ТПЖ двух соседних кабелей, для схемы, показанной на рис. 1а, можно записать  $S_{12} = S_{23} = S$ , а  $S_{13} = 2S$ . Тогда  $S_c = \sqrt[3]{S \cdot S \cdot 2S} = 1,26S$ . Очевидно, что при раскладке одножильных кабелей по вершинам равностороннего треугольника (рис. 1б)  $S_c = S$ .

В электрических сетях напряжением до 1 кВ возможна несимметричная система фазных одножильных кабелей, которая с электрофизической точки зрения эквивалентна четырехжильному небронированному кабелю с общим нулевым проводником PEN (рис. 2).

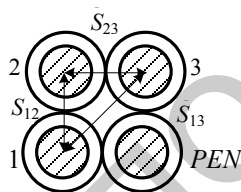


Рис. 2. Расположение одножильных фазных кабелей 1–3 по вершинам прямоугольного треугольника

Fig. 2. Location of single-core phase cables 1–3

on the tops of the rectangular triangle

При раскладке кабелей по схеме, показанной на рис. 2,  $S_{12} = S_{23} = S$ . Значение расстояния  $S_{13}$  можно найти, рассматривая его как гипотенузу прямоугольного треугольника, по выражению

$$S_{13} = \sqrt{S^2 + S^2} = \sqrt{2S^2} = 1,41S. \quad (12)$$

Тогда среднегеометрическое расстояние между центрами жил кабелей определяется по формуле

$$S_c = \sqrt[3]{S \cdot S \cdot 1,41S} = 1,12S. \quad (13)$$

Формулу для расчета удельной индуктивности одножильных кабелей можно представить в следующем виде:

$$L_0 = 0,2 \ln \frac{2k_c S}{d} + 0,05, \quad (14)$$

где  $k_c$  – коэффициент, учитывающий схему раскладки одножильных кабелей.

Значение  $k_c$  принимается равным:

1,00 – при раскладке кабелей треугольником вплотную;

1,12 – при раскладке по вершинам прямоугольного треугольника;

1,26 – при раскладке в одной плоскости.

При расположении кабелей вплотную друг к другу по треугольнику расстояние между центрами жил соседних кабелей  $S = D$ , а в плоскости  $S = 2D$  (рис. 1).

Для одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ, технические характеристики которых представлены в табл. 1, определены значения удельной индуктивности по формуле (14) и погонного индуктивного сопротивления по (5). Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Удельные индуктивности и индуктивные сопротивления  
одножильных кабелей напряжением 1 кВ

The specific inductance and inductive reactance values  
of 1 kV single-core cables

Площадь сечения токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Расположение по треугольнику				Расположение в плоскости	
	равностороннему		прямоугольному			
	$L_0$ , мГн/км	$x_0$ , Ом/км	$L_0$ , мГн/км	$x_0$ , Ом/км	$L_0$ , мГн/км	$x_0$ , Ом/км
185	0,252	0,079	0,274	0,086	0,436	0,137
240	0,247	0,078	0,269	0,084	0,432	0,136
300	0,242	0,076	0,264	0,083	0,427	0,134
400	0,239	0,075	0,262	0,082	0,424	0,133
500	0,237	0,074	0,259	0,081	0,422	0,133
630	0,236	0,074	0,259	0,081	0,421	0,132
800	0,231	0,073	0,253	0,079	0,416	0,131

Анализ результатов расчета показывает, что удельные индуктивности и индуктивные сопротивления одножильных кабелей при расположении в одной плоскости в 1,7–1,8 раза больше, чем при расположении вплотную по треугольнику. При этом, как показано в [10], индуктивные сопротивления кабелей крайних фаз зависят от соотношения их токов. Более благоприятным является расположение кабелей по вершинам прямоугольного треугольника (рис. 2). В этом случае их индуктивные сопротивления не более чем на 10 % больше, чем при оптимальном расположении одножильных кабелей.

Если при изготовлении кабеля суммарная толщина оболочки и изоляции увеличена на 1 мм, что допустимо, это приводит к увеличению индук-



тивного сопротивления на 4–7 % при расположении кабелей треугольником и на 2–4 % – в горизонтальной плоскости.

### Учет влияния поверхностного эффекта и эффекта близости на индуктивные сопротивления кабелей

При больших сечениях проводников происходит уплотнение тока у поверхности жилы из-за поверхностного эффекта (скин-эффекта), вследствие чего снижаются напряженность магнитного поля внутри жилы и ее индуктивность. Оказывает влияние на индуктивность и эффект близости [11]. Это приводит к некоторому уменьшению индуктивного сопротивления линий. Индуктивность одножильного кабеля с учетом указанных эффектов определяется по формуле [7]

$$L_0 = 0,1 \left( 2 \ln \frac{2k_c S}{d} + 0,5Q(X) \right), \quad (15)$$

где  $Q(X)$  – коэффициент, учитывающий внутреннюю индуктивность ТПЖ.

Согласно [7],  $Q(X) = (0,5-1,0)$ . При расчете индуктивности силовых кабелей значение  $Q(X)$  принимается равным 0,50 и 0,75.

Для иллюстрации выполним расчет  $L_0$  по формуле (15) и  $x_0$  по (5) для одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ (табл. 1) при раскладке их треугольником вплотную (рис. 1б). Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения  $L_0$  и  $x_0$  одножильных кабелей с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости  
 $L_0$  and  $x_0$  values of single-core cables, taking into account the surface effect and proximity effect

Площадь сечения токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	$Q(X) = 0,50$		$Q(X) = 0,75$	
	$L_0$ , мГн/км	$x_0$ , Ом/км	$L_0$ , мГн/км	$x_0$ , Ом/км
185	0,227	0,071	0,238	0,075
240	0,222	0,070	0,234	0,073
300	0,217	0,068	0,229	0,072
400	0,214	0,067	0,226	0,071
500	0,212	0,067	0,224	0,070
630	0,211	0,066	0,224	0,070
800	0,206	0,065	0,218	0,068

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что значения  $L_0$ , рассчитанные по (15) при  $Q(X) = 0,50$ , на 10–11 %, а при  $Q(X) = 0,75$  – на 5–7 % меньше, чем по формуле (14). Отсюда следует вывод о целесообразности учета скин-эффекта и эффекта близости при определении индуктивного сопротивления кабельных линий.

### Индуктивные сопротивления бронированных кабелей

При наличии в непосредственной близости к ТПЖ кабеля элементов, выполненных из магнитных материалов (например, стальной брони), его индуктивность возрастает. В трехжильных кабелях влиянием на индуктивность стальной ленточной или проволочной брони пренебрегают, так как результирующий магнитный поток в пространстве, окружающем жилы, в некотором удалении от них незначителен [10].

Для определения удельной индуктивности, мГн/км, бронированных одножильных кабелей может использоваться следующая формула [10]:

$$L_0 = 0,2 \left( \ln \frac{2S}{d} + \mu \ln \frac{D_2}{D_1} \right) + 0,05, \quad (16)$$

где  $D_2$  – диаметр кабеля поверх брони, мм;  $D_1$  – то же кабеля под броней, мм;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость брони кабеля.

Значения  $D_1$  и  $D_2$  можно определить по следующим формулам:

$$D_1 = d + 2\delta_n; \quad (17)$$

$$D_2 = D - 2\delta_o. \quad (18)$$

Относительная магнитная проницаемость вычисляется по выражению

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}, \quad (19)$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м.

Магнитная проницаемость связывает магнитную индукцию  $B$  и напряженность магнитного поля  $H$  в веществе

$$\mu_a = \frac{B}{H}. \quad (20)$$

Величина  $\mu_a$  зависит от строения и магнитного состояния вещества, а также от напряженности магнитного поля. Зависимость между  $B$  и  $H$  для ферромагнитных материалов не имеет точного аналитического выражения. В связи с этим для каждого ферромагнитного материала данная зависимость представляется в виде кривой намагничивания  $B = f(H)$ , которая определяется опытным путем [11]. Из-за указанного обстоятельства практические расчеты  $L_0$  по выражению (16) дают лишь приближенные результаты.

В качестве иллюстративного примера определим значения  $L_0$  и  $x_0$  для одножильного кабеля марки ПвБШв 1х800-1 с изоляцией из СПЭ, бронированного стальными лентами. Технические характеристики кабеля:  $d = 34,2$  мм;  $\delta_n = 2,6$  мм;  $\delta_o = 1,4$  мм;  $D = 47$  мм. Примем, что стальная

броня кабеля выполнена из низкоуглеродистой стали марки Э320, имеющей абсолютную магнитную проницаемость  $\mu_a = 0,125 \cdot 10^{-4}$  Гн/м.

По (19) относительная магнитная проницаемость брони кабеля

$$\mu = \frac{0,125 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 9,95.$$

Произведем расчеты  $D_1$  и  $D_2$  по формулам (17) и (18):

$$D_1 = 34,2 + 2 \cdot 2,6 = 39,4 \text{ мм};$$

$$D_2 = 47 - 2 \cdot 1,4 = 44,2 \text{ мм}.$$

Вычислим по (16)  $L_0$  при расположении кабелей по вершинам равно-стороннего треугольника (рис. 1б)

$$L_0 = 0,2 \left( \ln \frac{2 \cdot 47}{34,2} + 9,95 \cdot \ln \frac{44,2}{39,4} \right) + 0,05 = 0,481 \text{ мГн/км}.$$

Погонное индуктивное сопротивление кабеля находим по формуле (5)

$$x_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,481 \cdot 10^{-3} = 0,151 \text{ Ом/км}.$$

Расчеты показали, что при расположении треугольником вплотную бронированные одножильные кабели с ТПЖ площадью сечения  $800 \text{ мм}^2$  в сравнении с небронированными (табл. 2) имеют индуктивное сопротивление примерно в два раза больше.

Согласно ГОСТ 31996 [4], применение стальных лент для бронирования одножильных кабелей, предназначенных для эксплуатации в электрических сетях переменного напряжения, не допускается, что равнозначно запрету на использование в этих сетях таких кабелей. Однако в практике проектирования СЭС промышленных предприятий и других объектов данный документ не нашел широкого применения. В связи с этим в Республике Беларусь имели случаи проектирования и сооружения линий напряжением 0,4 кВ для электроснабжения производственных объектов, выполненных одножильными кабелями, бронированными стальными лентами. Созданные СЭС оказались настолько неэффективными, что потребовалась реконструкция питающих линий электропередачи практически сразу же после их ввода в эксплуатацию.

Следует отметить, что бронированные кабели необходимы в тех случаях, когда требуется их усиленная механическая защита (при прокладке в зонах с пучинистыми или подвижными грунтами, по дну реки или судоходного водоема и т. п.). При необходимости дополнительной механической защиты кабельных линий нужно использовать одножильные кабели с проволочной броней, выполненной из немагнитного материала: алюминия или его сплава [12].

### ВЫВОДЫ

1. Для выполнения электрических расчетов сетей напряжением до 1 кВ необходимы информация и расчетные формулы для определения индуктивности и индуктивного сопротивления одножильных кабелей, зависящих от конструктивных особенностей кабелей и их раскладки при сооружении кабельной линии. Однако нормативно-техническая документация с точными параметрами одножильных кабелей напряжением до 1 кВ отсутствует. Значения индуктивности и индуктивного сопротивления, рассчитанные по формулам, приводимым в разных литературных источниках, существенно отличаются.

2. В технических нормативных правовых актах и документации производителей кабельной продукции следует приводить расчетные формулы и значения удельной индуктивности и индуктивного сопротивления одножильных кабелей напряжением до 1 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена для наиболее распространенных способов их раскладки. Это будет способствовать повышению точности расчетов электрических сетей.

3. В трехфазных электрических сетях переменного тока, согласно ГОСТ 31996 [4], недопустимо применять одножильные кабели, бронированные стальными лентами. Данный запрет целесообразно внести в действующие нормативные документы, применяемые при проектировании кабельных электрических сетей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ветхов, П. С. Применение полиэтиленового кабеля среднего напряжения для промышленных предприятий / П. С. Ветхов // Промышленная энергетика. 2001. № 8. С. 16–20.
2. Невар, Г. А. Вопросы развития электрических сетей с применением кабелей с полимерной изоляцией / Г. А. Невар // Энергия и Менеджмент. 2010. № 4. С. 16–20.
3. Радкевич, В. Н. О применении одножильных кабелей напряжением до 1 кВ в системах электроснабжения промышленных предприятий / В. Н. Радкевич, В. В. Сталович // Энергия и Менеджмент. 2017. № 6. С. 9–17.
4. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия: ГОСТ 31996–2012. Введ. 01.01.2016. Минск: Госстандарт, Минск: БелГИСС, 2015. 34 с.
5. Инструкция по эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6, 10, 20, 35 кВ. 2-е изд. Кольчугино: ОАО «Электрокабель» Кольчугинский завод, 2008. 38 с.
6. Инструкция по эксплуатации силовых кабельных линий. Часть 1. Кабельные линии напряжением до 35 кВ: РД 34.20.508. М.: Союзтехэнерго, 1980. 95 с.
7. Каменский, М. Силовые кабели 1–10 кВ с пластмассовой изоляцией. Расчет активного и индуктивного сопротивлений [Электронный ресурс] / М. Каменский, С. Холодный. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/15.php>. Дата доступа: 17.07.2017.
8. Кабельные системы с изоляцией из сшитого полиэтилена [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.tyret.ru/userfiles/file/doc/cable/XLPE Cable System Users Guide](http://www.tyret.ru/userfiles/file/doc/cable/XLPE%20Cable%20System%20Users%20Guide.pdf). Дата доступа: 17.03.2018.
9. Бачелис, Д. С. Электрические кабели, провода и шнуры / Д. С. Бачелис, Н. И. Белорусов, А. Е. Саакян. М.: Энергия, 1971. 704 с.
10. Руководство по выбору, прокладке, монтажу, испытаниям и эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ: РД К28-003:2007. Харьков: ЗАО завод «Южкабель», 2007. 104 с.

11. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. М.: Энергия, 1975. 752 с.
12. Дмитриев, М. В. Бронированные кабели 6–35 кВ. Проблемы и возможные решения [Электронный ресурс] / М. В. Дмитриев. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/96/08.php>. Дата доступа: 25.08.2017.

Поступила 11.04.2018 Подписана в печать 19.06.2018 Опубликовано онлайн 27.07.2018

#### REFERENCES

1. Vetkhov P. S. (2001) Application of Medium Voltage Polyethylene Cable for Industrial Enterprises. *Promyshlennaya Energetika = Industrial Power Engineering*, (8), 16–20 (in Russian).
2. Nevar G. A. (2010) Issues of Development of Electric Networks Using Polymer-Insulated Cables. *Energiya i Menedzhment [Power and Manahement]*, (4), 16–20 (in Russian).
3. Radkevich V. N., Stalovich V. V. (2017) On the Application of Single-Core Cables up to 1 kV in Power Supply Systems of Industrial Enterprises, *Energiya i Menedzhment [Power and Manahement]*, (6), 9–17 (in Russian).
4. State Standard 31996–2012 (2015) *Power Cables with Plastic Insulation at a Rated Voltage of 0.66; 1 and 3 kV. General Specifications*. Minsk, Gosstandart; BelGISS. 34 (in Russian).
5. *Operating Instructions on Operation of Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation Energized of 6, 10, 20, 35 kV* (2008) Kol'chugino, JSC "Electrocable Works, Kolchugino". 38 (in Russian).
6. RD 34.20.508 (1980) *Operating Instructions for Power Cable Lines Operation. Part 1. Cable Lines up to 35 kV*. Moscow, Soyuztekhnenergo. 95 (in Russian).
7. Kamenskii M., Kholodnyi S. *Power Cables 1–10 kV with Plastic Insulation. Calculation of Active and Inductive Resistances*. Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/15.php>. (Accessed 17 July 2017) (in Russian).
8. Cable Systems Insulated with Cross-Linked Polyethylene. Available at: [www.tyret.ru/userfiles/file/doc/cable/XLPE Cable System Users Guide](http://www.tyret.ru/userfiles/file/doc/cable/XLPE%20Cable%20System%20Users%20Guide.pdf). (Accessed 17 March 2018) (in Russian).
9. Bachelis D. S., Belorussov N. I., Saakyan A. E. (1971) *Electrical Cables, Wires and Cords*. Moscow, Energiya Publ. 704 (in Russian).
10. RD K28-003:2007 (2007) *Guidelines for the Selection, Laying, Installation, Testing and Operation of Cables Insulated with of Cross-Linked Polyethylene at a Voltage of 6 to 35 kV*. Kharkov, CJSC "Yuzhkabel" Plant. 104 (in Russian).
11. Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strakhov S. V. (1975) *Basics of Circuit Theory*. Moscow, Energiya Publ. 752 (in Russian).
12. Dmiyriev M. V. *Armoured Cables 6–35 kV. Problems and Possible Solutions*. Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/96/08.php>. (Accessed 25 August 2017) (in Russian).

Received: 11 April 2018

Accepted: 19 June 2018

Published online: 27 July 2018