

Токи короткого замыкания в электрических сетях, содержащих современные кабельные линии 6–500 кВ

УДК 621.315.21

Активные и индуктивные сопротивления воздушных и кабельных линий важны для расчета любых нормальных и аварийных режимов работы сети. В частности, они нужны для определения токов короткого замыкания сети, от которых зависит выбор сечения проводов и кабелей, а также выбор выключателей. В настоящее время в расчеты закладываются неверные параметры кабельных линий, что приводит к занижению токов короткого замыкания сети. Использование корректных значений сопротивлений прямой и нулевой последовательности способно повысить токи короткого замыкания до 20–30% и более.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент

Ключевые слова:
ток короткого замыкания, воздушная линия, кабельная линия, однофазный кабель, сшитый полиэтилен, продольное сопротивление линии, прямая последовательность, нулевая последовательность, заземление экранов

Линии электропередачи классов 6–500 кВ играют ключевую роль в передаче и распределении электрической энергии. Параметры линий оказывают свое влияние на широкий перечень характеристик электрической сети:
– потери активной и реактивной мощности;
– уровни напряжения в узлах сети;
– токи короткого замыкания.

Для расчета нормальных и аварийных режимов работы сети важно использовать корректные значения параметров линий по прямой и нулевой последовательностям, среди которых различают:
– продольное активное сопротивление (R_1, R_0);
– продольное индуктивное сопротивление (X_1, X_0);
– поперечную емкость (C_1, C_0).

Ниже в статье оценим те последствия, которые может иметь неверное задание параметров линий при расчете токов короткого замыкания (КЗ). Стоит напомнить, что токи КЗ играют ключевую роль при проектировании электрических сетей. Например, они оказывают непосредственное влияние:
– на выбор сечения проводов и тросов ВЛ, а также на выбор сечения жил и экранов КЛ (вопросы термической стойкости);
– на выбор крепления токоведущих частей (вопросы динамической стойкости);
– на выбор выключателей (вопросы отключающей способности);
– на настройку релейной защиты и автоматики;
– на потенциалы заземляющих устройств и безопасность персонала;
– на электромагнитную совместимость (вопросы магнитного поля).

Далее, рассуждая о токах КЗ, не будем рассматривать емкость линии, а основное внимание уделим только продольным параметрам R_1, R_0 и X_1, X_0. Такое допущение связано с тем, что емкость

линии C_1, C_0, как правило, не влияет на величину тока КЗ (здесь не учитываем замыкание на землю).

Подходы к определению продольных параметров отличаются в зависимости от той последовательности, о которой идет речь. Если сопротивления R_1 и X_1 обычно находят путем расчетов по известным формулам, то сопротивления R_0 и X_0, напротив, вычисляют лишь косвенно — путем умножения уже найденных R_1 и X_1 на приведенные в нормативных документах типовые соотношения R_0 / R_1 и X_0 / X_1:

$$R_0 = R_1 \cdot R_0 / R_1,$$
$$X_0 = X_1 \cdot X_0 / X_1.$$

В статье дадим оценку последствиям того, что в кабельных сетях нашей страны для КЛ используются неверные:
– формулы для расчета R_1 и X_1;
– представления о соотношениях R_0 / R_1 и X_0 / X_1.

В частности, покажем, что использование неверных продольных параметров КЛ способно приводить к занижению токов КЗ, а реальные значения токов КЗ в кабельных сетях могут оказаться до 20–30% больше.

Отметим, что расчет токов КЗ делается многими организациями (проектными, научными, службами режимов РДУ/ОДУ), однако все они используют для этих целей специализированные компьютерные программы, которым излишне доверяют (так как принято полагать, что компьютер «не может ошибаться»). На самом же деле указанные программы основаны на неверных представлениях о параметрах прямой и нулевой последовательности КЛ, поскольку, например, от их пользователей даже не требуется задавать такую важнейшую информацию, как сечение экранов и схема их заземления.

ПАРАМЕТРЫ КЛ ИЗ КАТАЛОГОВ

Каталоги кабельных заводов и некоторые отраслевые стандарты содержат одни и те же очень простые формулы для расчета продольных параметров КЛ прямой последовательности. По причинам, которые поясним позже, будем обозначать такие каталожные параметры как R_{11} и X_{11}:

$$R_{11} = R_{11}^* \cdot l_{КЛ},$$
$$X_{11} = \omega L_{11}^* \cdot l_{КЛ},$$

где R_{11}^* и L_{11}^* — погонные значения активного сопротивления и индуктивности; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота (f = 50 Гц); $l_{КЛ}$ — длина КЛ.

Активное сопротивление:

$$R_{11}^* = K_П \cdot \rho_Ж / F_Ж,$$

где $F_Ж$ — поперечное сечение жилы; $\rho_Ж$ — удельное активное сопротивление материала жилы (зависит от температуры, при которой необходимо определить параметры КЛ); $K_П$ — коэффициент поверхностного эффекта, зависящий от сечения жилы $F_Ж$ (у медной жилы $K_П$ = 1 ÷ 1,15, у алюминиевой жилы $K_П$ = 1 ÷ 1,06).

В случае двустороннего заземления экранов КЛ, согласно [1, 2], в них наводятся переменные токи $I_Э$ и возникают потери активной мощности $P_Э$. Токи $I_Э$ и потери $P_Э$ увеличиваются по мере роста:
– расстояния между фазами s;
– сечения экрана $F_Э$.

Активное сопротивление прямой последовательности R_1^* обязательно должно учитывать основные источники потерь активной мощности КЛ — и потери в жилах $P_Ж$, и потери в экранах $P_Э$. Следовательно, в случае двустороннего заземления экранов КЛ в формуле для R_1^* обязательно должно присутствовать не только сечение $F_Ж$, но также величины s и $F_Э$, от которых зависит $P_Э$.

Если посмотреть на приведенную выше формулу для активного сопротивления, то в ней отсутствуют s и $F_Э$, а значит такая формула учитывает только потери в жилах $P_Ж$ и не учитывает потерь в экранах $P_Э$. Таким образом, данная формула применима только для КЛ со следующими схемами, не имеющими токов и потерь в экранах [1, 2]:
– одностороннее заземление;
– транспозиция экранов.

Итак, активное сопротивление прямой последовательности КЛ, которое дает формула из каталогов, лучше обозначать не R_1^*, а иначе — пусть R_{11}^*.

Индуктивность:

$$L_{11}^* = L_{ВН}^* + \frac{\mu_0}{2\pi} ln\left(\frac{s}{r_1}\right),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; s — среднее по трассе КЛ расстояние между осями фаз; r_1 — радиус жилы; $L_{ВН}^* = 0{,}05 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — внутренняя индуктивность жилы.

После перевода всех величин из размерности Гн/м в размерность мГн/км:

$$L_{11}^* = 0{,}05 + 0{,}2 ln\left(\frac{s}{r_1}\right).$$

При двустороннем заземлении экранов КЛ в них проходят наведенные токи $I_Э$, которые тем больше, чем больше у КЛ расстояние между фазами s и сечение экрана $F_Э$. Эти экранные токи своим магнитным полем ослабляют магнитное поле токов жил $I_Ж$, и поэтому у КЛ снижается индуктивность прямой последовательности L_1^*.

Если посмотреть на приведенную выше формулу для индуктивности, то в ней отсутствует сечение $F_Э$, а значит формула не учитывает наведенных токов в экранах $I_Э$. Таким образом, формула применима только для КЛ со следующими схемами, не имеющими токов и потерь в экранах [1, 2]:
– одностороннее заземление;
– транспозиция экранов.

Итак, индуктивность прямой последовательности КЛ, которую дает формула из каталога, лучше обозначать не L_1^*, а иначе — пусть L_{11}^*.

Еще раз обратим внимание, что для любой КЛ с двусторонним заземлением экранов продольная индуктивность КЛ прямой последовательности L_1^* всегда будет меньше значения L_{11}^* из каталога. В частности, это означает, что в кабельных сетях, где много КЛ с двусторонним заземлением экранов (обычно это сети 6–35 кВ), реальные токи трехфазного КЗ окажутся больше значений, рассчитанных с помощью каталогов.

Заключение по параметрам из каталогов. Формулы для продольных параметров КЛ прямой последовательности, которые приведены в каталогах кабельных заводов, могут использоваться исключительно для КЛ с односторонним заземлением экранов или их транспозицией, а для двустороннего заземления экранов они не годятся. Поскольку каталоги не дают разъяснений на этот счет, то у инженеров складывается ошибочное впечатление, что каталожные формулы являются универсальными и применимы для любой КЛ.

Следует отметить, что зачастую в каталогах формулы R_{11}* и L_{11}* указываются без индексов «1», просто как R* и L*. Это приводит к тому, что инженеры воспринимают их не как параметры прямой последовательности, а как универсальные параметры КЛ, справедливые и для прямой, и для нулевой последовательностей, что будет неверным. На самом деле параметры КЛ по нулевой последовательности могут в разы отличаться от параметров по прямой — рассмотрим этот вопрос далее.

ПАРАМЕТРЫ КЛ ИЗ СТАНДАРТОВ

Как правило, стандарты содержат те же самые формулы для параметров прямой последовательности, что приводятся в кабельных каталогах. Данные формулы верны для ряда схем заземления экранов, но не для всех. Однако, вне зависимости от схемы заземления экранов, по таким формулам никак нельзя рассчитать параметры нулевой последовательности.

Для оценки параметров нулевой последовательности используют стандарт [3], где дана информация и по ВЛ, и по КЛ. Например, согласно п. 4.2.5 для ВЛ характерно X_0 / X_1 = 2,0 ÷ 5,5, а конкретные значения зависят от свойств тросов и числа цепей ВЛ (таблица 1). Видно, что чем лучше тросы проводят ток, тем меньше будет величина X_0 / X_1. Например, если бы тросы ВЛ, как экраны современных кабелей, можно было бы изготавливать не стальными (или из сплавов алюминия), а чисто медными, причем большого сечения, то вполне вероятно, что для ВЛ получилось бы даже $X_0 / X_1 < 1$.

Для КЛ согласно п. 4.2.6 «Сопротивление нулевой последовательности кабелей зависит от характера их прокладки, наличия или отсутствия проводящей оболочки, сопротивления заземлений проводящей оболочки (если она имеется) и других факторов. При приближенных расчетах допустимо принимать»:

$$X_0 / X_1 = 3{,}5 \div 4{,}5,$$

$$R_0 / R_1 = 10.$$

Видно, что, в целом, для ВЛ и КЛ соотношение X_0 / X_1 согласно стандарту [3] примерно одинаково. Однако здесь стоит обратить внимание, что [3] опубликован в 1998 году, когда доминирующими были кабели с бумажной изоляцией, не имеющие медных проволочных экранов. Появление у КЛ таких экранов (в п. 4.2.6 их называют «проводящая оболочка»), разумеется, существенно изменит для КЛ типовые соотношения X_0 / X_1.

Современные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) обязательно оснащаются хорошо проводящими медными экранами, а значит для таких КЛ следует ожидать снижения X_0 / X_1, причем вплоть до $X_0 / X_1 < 1$. Получается, что приведенные в [3] значения X_0 / X_1 = 3,5 ÷ 4,5 в настоящее время, скорее всего, уже не могут применяться.

Если обратиться к таблице 1 для ВЛ, то там четко указывается, что влияние свойств тросов на X_0 / X_1 происходит исключительно при условии заземления тросов, то есть при обеспечении возможности прохождения по ним токов. Аналогичная ситуация будет и для КЛ — появление хорошо проводящих медных экранов способно снизить X_0 / X_1, но только если по ним обеспечена возможность прохождения токов.

Если экраны КЛ односторонне заземлены, то токи нулевой последовательности там проходить не могут (даже если экраны сделаны из меди), а значит соотношение X_0 / X_1 = 3,5 ÷ 4,5 стандарта [3], по всей видимости, здесь не утратило актуальность. Что же касается двустороннего заземления экранов КЛ или их транспозиции, то токи нулевой последовательности без проблем замыкаются по таким экранам, а значит соотношение X_0 / X_1 будет меньше, чем в [3], вплоть до $X_0 / X_1 < 1$.

Итак, в современной кабельной сети для КЛ справедливо не X_0 / X_1 = 3,5 ÷ 4,5, как полагалось ранее, а меньшие соотношения, вплоть до $X_0 / X_1 < 1$. Это означает, что в кабельных сетях токи однофазного КЗ на самом деле могут оказаться существенно больше тех значений, которые рассчитывались ранее с помощью параметров из [3].

КОРРЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КЛ

В [1, 2] предложены формулы для расчета продольных параметров современных КЛ, выполненных экранированными кабелями. Эти формулы учитывают основные влияющие факторы, в том числе:

– схему заземления экранов;
– сечение и материал экранов;
– расстояние между кабелями;
– последовательность (прямую, нулевую).

Диапазон изменения параметров КЛ, рассчитанных по [1, 2], был дан в статье [4] и продублирован в табли-

Табл. 1. Соотношение X_0 / X_1 для ВЛ в зависимости от тросов и числа цепей (по данным [3])

Характеристика ВЛ	X_0 / X_1	
	1 цепь	2 цепи
Без заземленных тросов	3,5	5,5
С заземленными тросами из стали	3,0	4,7
С заземленными тросами из хорошо проводящих материалов	2,0	3,0

Табл. 2. Корректные параметры современных КЛ (по данным статьи [4])

Схема заземления экранов КЛ	Прямая последовательность		Нулевая последовательность	
	R_1	X_1	R_0 / R_1	X_0 / X_1
Одностороннее заземление	R_{11}	X_{11}	3 ÷ 15	4 ÷ 25
Транспозиция экранов			2 ÷ 30	0,25 ÷ 2
Двустороннее заземление	(1,01 ÷ 5) · R_{11}	(0,45 ÷ 0,99) · X_{11}	1 ÷ 20	0,5 ÷ 2

це 2 (для расчета сопротивлений R_{11} и X_{11} верны приведенные выше формулы из кабельных каталогов). Из таблицы 2 можно сделать следующие выводы:

– параметры прямой последовательности КЛ при двустороннем заземлении экранов могут заметно отличаться от каталожных R_{11} и X_{11}, справедливых исключительно для одностороннего заземления экранов или их транспозиции;
– параметры нулевой последовательности КЛ заметно отличаются от стандарта [3], причем особенно следует обратить внимание на возможность ситуации $X_0 / X_1 < 1$.

ПРИМЕР ОЦЕНКИ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КЗ

Рассмотрим простую радиальную кабельную сеть, показанную на рисунке 1. В этой схеме оценим ток I_K трехфазного КЗ в конце КЛ. Указанный ток может быть нужен, например, для выбора сечений жил и экранов кабелей, подключенных последовательно с рассматриваемой КЛ (такие кабели на схеме условно обозначены как «нагрузка»).

Для определенности положим, что речь идет о сети класса 110 кВ с внутренним сопротивлением X_C = 2 Ом и наибольшим рабочим напряжением $U_{НР}$ = 127 кВ. Пусть КЛ 110 кВ имеет длину $l_{КЛ}$ = 5 км и выполнена однофазными кабелями с медными жилой $F_Ж$ = 1000 мм² и экраном $F_Э$ = 240 мм². Пусть кабели пофазно уложены в три полимерных трубы диаметром D = 225 мм каждой (трубы располагаются вплотную друг к другу пучком, то есть сомкнутым треугольником).

Параметры КЛ по каталогу. При сечении $F_Ж$ = 1000 мм² для меди, согласно [2], можно принять $K_П$ = 1,151 и $\rho_Ж = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Тогда по формуле из каталога найдем:

$$R_{11}^* = 23 \text{ мОм/км},$$
$$R_{11} = 23 \cdot 5 = 115 \text{ мОм}.$$

Для однофазного кабеля 110 кВ при $F_Ж$ = 1000 мм² радиус жилы r_1 = 18,8 мм, диаметр кабеля d = 80 мм. При прокладке фаз сомкнутым треугольником расстояние между осями фаз было бы $s = d$ = 80 мм, однако кабели пофазно размещены в трубах, и поэтому следует принять $s = D$ = 225 мм. Тогда по формуле из каталога найдем:

$$L_{11}^* = 0{,}546 \text{ мГн/км},$$
$$X_{11} = (2\pi \cdot 50) \cdot 0{,}546 \cdot 5 = 858 \text{ мОм}.$$

Корректные параметры КЛ [1, 2]. Если у КЛ выполнено одностороннее заземление экранов или их транспозиция, то тогда формулы каталога верны, и получим:

$$R_1 = R_{11} = 0{,}115 \text{ Ом},$$
$$X_1 = X_{11} = 0{,}858 \text{ Ом}.$$

Если у КЛ выполнено двустороннее заземление экранов, то формулы каталога на такой случай не распространяются. Для медного экрана $F_Э$ = 240 мм² определим (таблицы 1а и 1б из статьи [4]):

$$R_1 = 3{,}85 \cdot R_{11} = 3{,}85 \cdot 0{,}115 = 0{,}443 \text{ Ом},$$
$$X_1 = 0{,}472 \cdot X_{11} = 0{,}472 \cdot 0{,}858 = 0{,}405 \text{ Ом}.$$

Оценка тока трехфазного КЗ. Ток трехфазного КЗ в конце КЛ:

$$I_{K(3)} = \frac{E_C}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_C + X_1)^2}},$$

где X_C = 2 Ом и $E_C = U_{НР} / \sqrt{3} = 127 / \sqrt{3}$ = 73 кВ.

Если заложить в формулу параметры R_1 = 0,115 Ом и X_1 = 0,858 Ом согласно каталогу (именно они используются в специализированных программах расчета токов КЗ), то тогда ток КЗ в конце КЛ составит $I_{K(3)}$ = 25,5 кА.

Если заложить в формулу параметры R_1 = 0,443 Ом и X_1 = 0,405 Ом, которые справедливы для двустороннего заземления экранов и отсутствуют в каталоге, то тогда ток КЗ в конце КЛ составит $I_{K(3)}$ = 29,9 кА, что на 17% больше.

Итак, реальный ток КЗ оказался на 17% больше значения, которое было найдено с использованием формул каталога, не учитывающих все разнообразие применяемых на практике схем заземления экранов. Видно, что каталожные формулы могут давать заметные ошибки в расчете токов трехфазного КЗ кабельной сети.

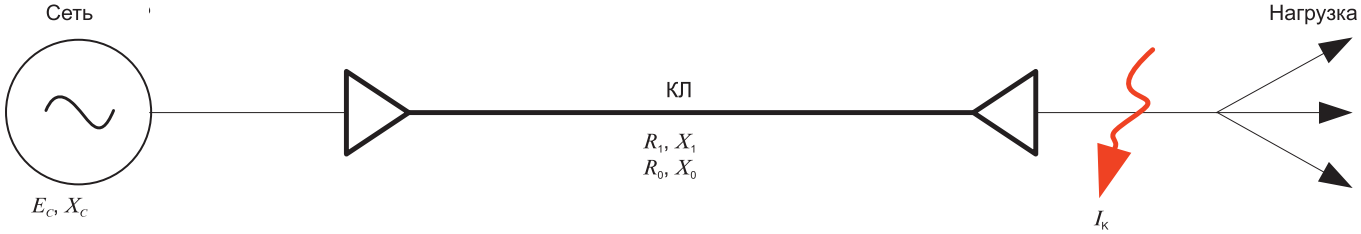


Рис. 1. Пример простейшей радиальной кабельной сети

ПРИМЕР ОЦЕНКИ ТОКА ОДНОФАЗНОГО КЗ

В условиях предыдущего примера положим, что КЛ 110 кВ имеет транспозицию экранов (одностороннее заземление для КЛ длиной 5 км обычно не применимо). Тогда параметры прямой последовательности — R_1 = 0,115 Ом и X_1 = 0,858 Ом, но требуются еще и параметры нулевой последовательности.

Параметры КЛ по стандарту [3]. Согласно [3] примем R_0 / R_1 = 10 и X_0 / X_1 = 3,5. Тогда

$$R_0 = 0{,}115 \cdot 10 = 1{,}15 \text{ Ом},$$
$$X_0 = 0{,}858 \cdot 3{,}5 = 3{,}0 \text{ Ом}.$$

Корректные параметры КЛ [1, 2]. Определим (таблицы 3а и 3б из статьи [4]), что справедливо R_0 / R_1 = 5,2 и X_0 / X_1 = 0,25. Тогда

$$R_0 = 0{,}115 \cdot 5{,}2 = 0{,}6 \text{ Ом},$$
$$X_0 = 0{,}858 \cdot 0{,}25 = 0{,}215 \text{ Ом}.$$

Оценка тока однофазного КЗ. Ток однофазного КЗ в конце КЛ:

$$I_{K(3)} = \frac{3E_C}{\sqrt{(2R_1 + R_0)^2 + (2(X_C + X_1) + (X_C + X_0))^2}}.$$

Если заложить в формулу параметры нулевой последовательности [3], которые справедливы для устаревших КЛ с бумажной изоляцией, то получим $I_{K(1)}$ = 20,3 кА. Если заложить в формулу корректные параметры современных КЛ с СПЭ-изоляцией по [1, 2], то получим $I_{K(1)}$ = 27,5 кА, что на 35% больше.

Итак, реальный ток КЗ оказался на 35% больше значения, которое было найдено с использованием формул стандарта, не учитывающего, что современные КЛ имеют хорошо проводящие экраны. Видно, что соотношения R_0 / R_1 и X_0 / X_1 из стандарта [3] могут давать заметные ошибки в расчете токов однофазного КЗ кабельной сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Параметры прямой последовательности КЛ, повсеместно используемые в расчетах токов КЗ сети, являются верными только при условии отсутствия токов в экранах кабелей, что характерно исключительно для одностороннего заземления экранов или их транспозиции. При двустороннем заземлении экранов параметры КЛ могут существенно отличаться.
2. Параметры нулевой последовательности КЛ, повсеместно используемые в расчетах токов КЗ сети, являются верными только для старых кабелей с бумажной изоляцией. Для современных КЛ с СПЭ-изоляцией, которые оснащаются медными экранами (зачастую большого сечения), параметры КЛ могут существенно отличаться.
3. В проектных организациях и в диспетчерских службах РДУ/ОДУ используются специализированные программы расчета токов КЗ, однако обычно затруднительно получить информацию о тех формулах, которые используют программы. Вместе с тем, можно предложить простое правило проверки программ на их применимость для расчетов токов КЗ кабельной сети: не рекомендуется доверять тем программам, которые не требуют от пользователя исходных данных:
   – о схеме заземления экранов кабелей;
   – о сечении экранов кабелей;
   – о материале экранов кабелей;
   – о расстоянии между кабелями КЛ.
4. В статье было показано, что использование в расчетах некорректных параметров КЛ способно приводить к неприятным сюрпризам. Так в кабельных сетях реальные токи КЗ могут оказаться до 20–30% выше расчетных значений. Например, в статье были рассмотрены случаи, когда уточнение параметров КЛ привело к росту тока:
   – на 17% для трехфазного КЗ;
   – на 35% для однофазного КЗ.
5. Рекомендуется внести необходимые правки в кабельные каталоги, в нормативные документы, в алгоритмы работы компьютерных программ расчета токов КЗ, чтобы исправить сложившуюся ситуацию с неверным расчетом продольных параметров современных КЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 152 с.
2. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. СПб: Политех-пресс, 2021. 688 с.
3. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. URL: https://docs.cntd.Ru/document/1200031256.
4. Дмитриев М.В. Продольные параметры кабельных линий 6–500 кВ с однофазными кабелями // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2018, № 1(46). С. 84–90.

REFERENCES

1. Dmitriev M.V. Bonding and grounding of 6-500 kV power cable screens. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2010. 152 p.
2. Dmitriev M.V. High voltage cable lines. St. Petersburg: Polytech-press, 2021. 688 p.
3. RD 153-34.0-20.527-98. Guidelines for the calculation of short-circuit currents and the selection of electrical equipment. URL: https://docs.cntd.Ru/document/1200031256.
4. Dmitriev M.V. Longitudinal parameters of 6-500 kV cable lines with single-phase cables // ELECTRIC POWER. Transmission and Distribution, 2018, no. 1(46), pp. 84-90.