

УДК 621.311

Определение индуктивных сопротивлений одножильных кабелей

Смирнов Е.Т.

Научный руководитель – к.т.н., доцент РАДКЕВИЧ В.Н.

В системах электроснабжения промышленных предприятий для питания мощных приемников и потребителей электроэнергии напряжением до 1 кВ и 6-10 кВ применяются одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Расчет режимов электрических сетей связан с необходимостью определения реактивного сопротивления кабельных линий электропередачи. Однако в технической документации по кабелям и в справочной литературе трудно найти значения индуктивных сопротивлений кабелей разного конструктивного исполнения, особенно при несимметричном расположении одножильных кабелей трехфазной линии электропередачи.

При переменном токе вокруг проводников создается переменное магнитное поле, из-за которого любая линия обладает индуктивным сопротивлением. Индуктивное сопротивление одной фазы линии рассчитывается по выражению

$$X = x_0 \cdot l \quad (1)$$

где x_0 – погонное реактивное сопротивление токопроводящей жилы (ТПЖ) кабеля, Ом/км;
 l – длина линии электропередачи, км.

Значение x_0 для кабелей определяется по формуле

$$x_0 = 2 \pi \cdot f \cdot L \quad (2)$$

где f – частота переменного тока, Гц;

L – индуктивность проводника, Гн/км.

Индуктивное сопротивление зависит от частоты тока. При наличии в электрических сетях высших гармоник тока и напряжения реактивное сопротивление проводников увеличивается, что может привести к недопустимому снижению качества напряжения, подводимого к потребителям.

Индуктивность электрической цепи характеризуется отношением магнитного потока Φ к току I , создавшему этот поток [1]

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (3)$$

Индуктивность учитывает энергию магнитного поля и явление самоиндукции. Она может быть представлена в следующем виде:

$$L = L_v + L_n \quad (4)$$

где L_v и L_n – соответственно внутренняя (собственная) и наружная (взаимная индуктивность) индуктивность.

Внутренняя индуктивность L_v обусловлена собственным током и магнитным потоком проводника, наружная L_n – токами и потоками соседних проводников.

Значение L_v , Гн/км, одножильного уединенного кабеля определяется по формуле [1]

$$L_v = 4,61 \lg \frac{D}{d} \cdot 10^{-4} \quad (5)$$

где D – наружный диаметр кабеля, мм;

d – диаметр проволоки в ТПЖ кабеля, мм.

При симметричном расположении трех одножильных небронированных кабелей по вершинам равностороннего треугольника (рисунок 1) индуктивность каждого кабеля, Гн/км, определяется по формуле [1]

$$L = (0,05 + 0,461 \lg \frac{S-r}{r}) 10^{-3} \quad (6)$$

где S - расстояние между центрами жил соседних кабелей, мм;
 r - радиус токопроводящей жилы кабеля, мм.

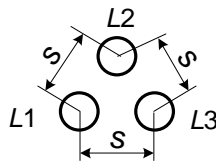


Рисунок 1 – Расположение одножильных кабелей фаз $L1, L2, L3$ по вершинам равностороннего треугольника

Из формулы (6) видно, что с увеличением расстояния между кабелями и уменьшением радиуса кабеля индуктивность L и, следовательно, реактивное сопротивление линии возрастает.

В случае несимметричного расположения проводников в одной плоскости (рисунок 2) проявляется эффект индуктивного переноса мощности, который приводит к неодинаковым взаимным индуктивностям между различными парами фаз. Так как на величину индуктивного сопротивления влияют взаимные индуктивности между кабелями, то индуктивные сопротивления крайних и среднего кабеля будут различны.

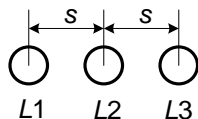


Рисунок 2 – Расположение одножильных кабелей трехфазной линии в одной плоскости

Из-за сложности расчета индуктивных сопротивлений кабелей при их несимметричном расположения с целью упрощения вводят понятие средней индуктивности L_c . Ее вычисляют по формуле аналогичной (6) с использованием среднегеометрического расстояния между центрами жил кабелей S_c :

$$L = (0,05 + 0,46 \lg \frac{S_c - r}{r}) 10^{-3} . \tag{7}$$

Значение S_c может быть найдено по формуле

$$S_c = \sqrt[3]{S_{12} \cdot S_{23} \cdot S_{13}} . \tag{8}$$

где S_{12}, S_{23} и S_{13} – соответственно расстояние между центрами жил кабелей фаз $L1$ и $L2, L2$ и $L3, L1$ и $L3$ (рисунок 3).

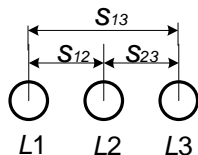


Рисунок 3 – Копределению значения S_c

Для примера произведен сравнительный расчет индуктивности одножильного кабеля с изоляцией из СПЭ марки АПвП 1х50-10 для обоих вариантов раскладки. Технические характеристики кабеля приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики кабеля АПвП 1х50-10

Сечение жилы, мм ²	Диаметр жилы, мм	Толщина экрана по жиле, мм	Сечение экрана, мм ²	Расчетный наружный диаметр кабеля, мм
50	7,9	0,6	16	25,5

Расчет индуктивности выполнен в зависимости от отношения расстояния между центрами ТПЖ S к наружному диаметру кабеля D . Значение S/D изменялось в диапазоне от 1 до 2,5. При определении индуктивности в случае раскладки кабелей в горизонтальной плоскости (рисунок 3) расчет выполнялся с использованием среднегеометрического расстояния между центрами жил кабелей S_c , найденного по формуле (8)

Результаты расчетов показаны в таблицах 2, 3, 4, 5.

Таблица 2 – Зависимость $L=f(S/D)$ для кабеля АПвП 1х50-10 при расположении треугольником.

S/D	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
L , мГн/км	0,3926	0,4149	0,4350	0,4532	0,4699	0,4853	0,4996	0,5129
S/D	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
L , мГн/км	0,5254	0,5372	0,5483	0,5588	0,5688	0,5784	0,5875	0,5962

Таблица 3 – Зависимость $L=f(S/D)$ для кабеля АПвП 1х50-10 при расположении в плоскости

S/D	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
S_c/D	1,2599	1,5245	1,8143	2,1293	2,4694	2,8348	3,2254	3,6412
L , мГн/км	0,4461	0,4889	0,5271	0,5618	0,5935	0,6228	0,6500	0,6753
S/D	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
S_c/D	4,0821	4,5483	5,0397	5,5563	6,0980	6,6650	7,2571	7,8745
L , мГн/км	0,6991	0,7215	0,7426	0,7627	0,7818	0,8000	0,8174	0,8340

Таблица 4 – Зависимость $x_0=f(S/D)$ для кабеля АПвП 1х50-10 при расположении треугольником.

S/D	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
x_0 , Ом/км	0,1233	0,1303	0,1366	0,1423	0,1475	0,1524	0,1569	0,1611
S/D	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
x_0 , Ом/км	0,1650	0,1687	0,1722	0,1755	0,1786	0,1816	0,1845	0,1872

Таблица 5 – Зависимость $x_0=f(S/D)$ для кабеля АПвП 1х50-10 при расположении в плоскости

S/D	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
S_c/D	1,2599	1,5245	1,8143	2,1293	2,4694	2,8348	3,2254	3,6412
x_0 , Ом/км	0,1401	0,1535	0,1655	0,1764	0,1864	0,1956	0,2041	0,2120
S/D	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
S_c/D	4,0821	4,5483	5,0397	5,5563	6,0980	6,6650	7,2571	7,8745
x_0 , Ом/км	0,2195	0,2265	0,2332	0,2395	0,2455	0,2512	0,2567	0,2619

По результатам расчетов, приведенным в таблицах 4 и 5, построим графики зависимости $X=f(S/D)$, показанные на рисунке 4.

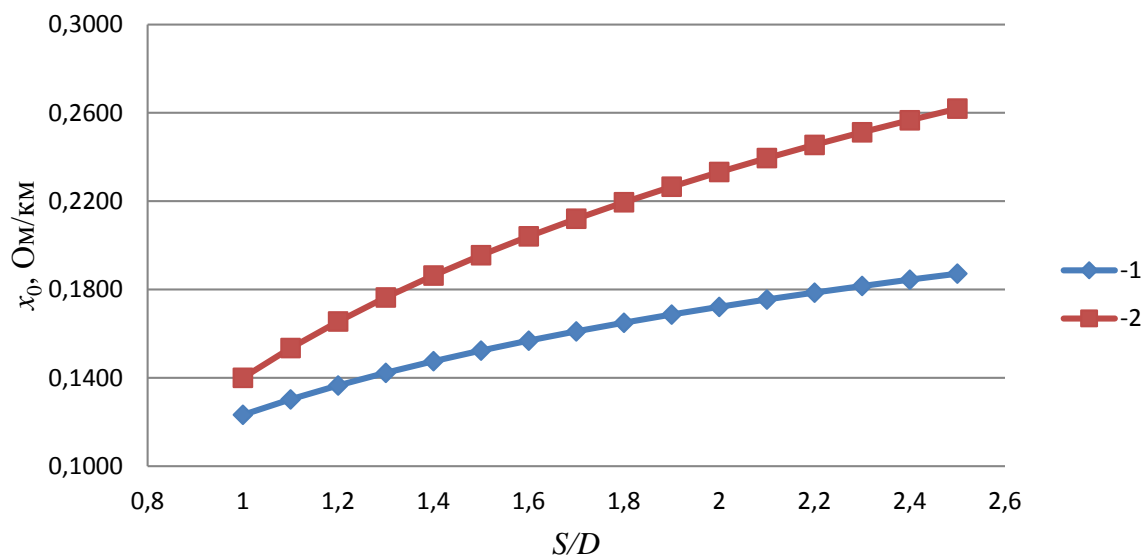


Рисунок 4 – Зависимости удельного сопротивления кабеля от расстояния между центрами жил, при различных видах раскладки кабелей: 1 – расположение кабелей треугольником; 2-расположение кабелей в плоскости

Полученные результаты показывают, что расположение симметричным треугольником более рационально по сравнению с расположением в одной плоскости.

Значения x_0 в справочной литературе приводится для определенного конструктивного исполнения многожильных кабелей или кабельной линии с одножильными кабелями [2]. Для одножильных кабелей напряжением выше 1 кВ x_0 обычно приводится при их расположении треугольником и в одной плоскости. Сравним полученные результаты с данными завода изготовителя [2] в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение результатов расчета с данными завода-изготовителя.

Полученные результаты x_0 , Ом/км		Данные завода-изготовителя x_0 , Ом/км	
Треугольная раскладка	Раскладка в плоскости	Треугольная раскладка	Раскладка в плоскости
0,123	0,140	0,126	0,168

Есть некоторое расхождение значений, но нельзя определить причину этих различий, из-за отсутствия значений для других расстояний в каталоге [2]. Иные расположения одножильных кабелей не предусматриваются. Следовательно, для других раскладок кабелей в справочниках и технических документах производителей отсутствуют численные данные x_0 или расчетные формулы, по которым можно найти значения удельных индуктивных сопротивлений.

Найти информацию по индуктивным сопротивлениям одножильных кабелей напряжением до 1 кВ крайне затруднительно вследствие указанных выше факторов. При значительных длинах линий напряжением до 1 кВ это делает невозможным выполнение достоверных расчетов режимов напряжения электрических сетей, что может привести к грубым ошибкам при проектировании СЭС.

Отметим, что рассмотренные выше формулы для расчета индуктивности справедливы в случае применения небронированных кабелей. Индуктивные сопротивления бронированных стальными лентами одножильных кабелей значительно больше, по сравнению с небронированными или с проволочной броней из немагнитных материалов (алюминия и его сплавов) [1].

Заключение

Индуктивные сопротивления одножильных кабелей зависят от конструктивного исполнения, влияющего на его наружный диаметр, и расстояния между центрами жил, которое устанавливается при прокладке кабельной линии электропередачи. Для обеспечения значений индуктивных сопротивлений, указанных в технической документации производителей, следует строго выдерживать расстояния между кабелями, предписанные инструкцией по прокладке. Наименьшие индуктивные сопротивления имеют кабельные линии, выполненные одножильными кабелями, расположенными вплотную по треугольнику. Одножильные кабели, расположенные в одной плоскости имеют большие реактивные сопротивления. При этом сопротивления кабелей крайних и среднего имеют неодинаковые значения. В справочной информации для такой раскладки приводятся средние значения индуктивного сопротивления одножильных кабелей, что вносит погрешности в расчеты потерь напряжения и реактивной мощности в кабельных линиях электропередачи.

Литература

1. Бачелис, Д.С. Электрические кабели, провода и шнуры (справочник) / Д.С. Бачелис, Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян. – М.: «Энергия», 1971. – 704 с.

Инструкция по эксплуатации кабелей из сшитого полиэтилена на напряжение 6, 10, 20, 35 кВ. Издание 2. - ОАО «Электрокабель «Кольчугинский завод». 2008. 39с