

УДК 621.311

Методика определения индуктивностей трехфазных силовых кабелей при расчетах переходных процессов в электрических сетях 6–10 кВ

В.К. Слышалов, В.А. Шуин, А.В. Куванов, Е.А. Воробьева, Г.А. Филатова
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Необходимость в расчетах переходных процессов в электрических кабельных сетях среднего напряжения 6–10 кВ возникает при решении ряда задач, связанных с повышением эффективности режимов заземления их нейтрали и технического совершенства устройств релейной защиты и автоматики, действующих при однофазных замыканиях на землю. Указанные расчеты, как правило, выполняются по упрощенным схемам замещения, не учитывающим зависимость продольных параметров кабельных линий от частоты, что в ряде случаев приводит к существенным погрешностям в оценке параметров электрических величин переходного процесса. В связи с этим необходимо создание моделей расчета индуктивностей трехфазных кабелей и обоснование их частотного диапазона.

Материалы и методы: Для определения частотных характеристик собственных и взаимных индуктивностей жил и оболочки трехфазного кабеля использованы известные уравнения для расчета собственной индуктивности провода цилиндрической формы, аппроксимация сечения секторных жил кабелей эллипсом, уравнения магнитного поля двухпроводной линии с эллиптическими и цилиндрическими проводами, общие уравнения магнитного поля в промежутке жила-оболочка, учитывающие реальную геометрию жил и оболочки трехфазного кабеля и поверхностный эффект. Для исследования переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ использованы аналитические методы решения в сочетании с имитационным моделированием на ЭВМ.

Результаты: Получены аналитические выражения для расчета частотных характеристик собственных и взаимных индуктивностей жил и оболочки трехфазного кабеля. Приведено обоснование частотного диапазона полученных характеристик.

Выводы: Разработанная методика определения частотных характеристик собственных и взаимных индуктивностей трехфазного кабеля позволяет получить более точные модели для расчета волновых и электромагнитных переходных процессов в кабельных сетях 6–10 кВ, в частности, при однофазных замыканиях на землю и определить области допустимого их применения.

Ключевые слова: электрические кабельные сети среднего напряжения, переходные процессы, частотные характеристики собственных и взаимных индуктивностей трехфазных кабелей 6–10 кВ, расчет индуктивности контура, однофазные замыкания на землю.

Methods of determining three-phase power cable inductances when calculating transients in 6–10 kV power systems

V.K. Slyshalov, V.A. Shuin, A.V. Kuvanov, E.A. Vorobyova, G.A. Filatova
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Abstract

Background: Transients in 6–10 kV medium-voltage electrical cable systems are calculated to solve a number of problems related to improving the effectiveness of neutral grounding modes and technical perfection of relay protection and automation operating under single phase-to-earth faults (SPEF). These calculations are usually carried out by simplified equivalent circuits not accounting for the dependence of the longitudinal parameters of cable lines on the frequency, which in some cases leads to significant errors in estimating the parameters of transient electrical quantities. This problem can be solved by developing models of calculating three-phase cable inductances and by justifying their frequency range.

Materials and Methods: The frequency characteristics of the self- and mutual inductances of three phase cable cores and sheath were determined by well-known equations for calculating cylindrical wire self-inductance, cable section ellipse approximation, magnetic field equations of the two-wire line with elliptical and cylindrical wires, general equations of magnetic field in the gap «core-sheath» taking into account the real geometry of the three-phase cable cores and sheath and surface effect. The transients under SPEF in 6–10 kV medium-voltage networks were studied by a combination of analytical and computer simulation methods.

Results: Analytical expressions for calculating frequency characteristics of self- and mutual inductances of three phase cable cores and sheath have been obtained. The article also describes the frequency range justification of the obtained characteristics.

Conclusions: The developed method of determining the frequency characteristics of the three-phase cable self- and mutual inductances provides a more accurate model for the calculation of wave and electromagnetic transients in 6–10 kV cable networks, in particular under SPEF, and identifies areas of their admissible application.

Key words: electric medium voltage cable networks, transients, frequency characteristics of self- and mutual inductances of 6–10 kV three-phase cables, circuit inductance calculation, single phase-to-earth faults.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.017-022

Введение. Большая часть электрической энергии распределяется потребителям через кабельные сети среднего напряжения 6–10 кВ, работающие с изолированной нейтралью, с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР) или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор. Неустойчивые однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в кабельных сетях 6–10 кВ, сопровождающиеся интенсивными переходными процессами при пробое изоляции фазы сети на землю, составляют 70–90 % от общего числа электрических повреждений и часто являются причиной опасных кратковременных нарушений электроснабжения или аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом.

Необходимость в анализе переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях 6–10 кВ возникает при решении следующих задач: оценка параметров и соотношений переходных токов и напряжений, используемых для действия защит от данного вида повреждений; исследование влияния переходных процессов на устойчивость функционирования защит от ОЗЗ, основанных на использовании различных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима (промышленной частоты, высших гармоник, «наложенных» токов); определение места (зоны) повреждения на ЛЭП; исследование перенапряжений в сетях, термической устойчивости ограничителей перенапряжений при дуговых перемежающихся ОЗЗ и др. [1–8].

Наилучшим способом исследования переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ является сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенных моделей (схем замещения) электрической сети и имитационного моделирования на ЭВМ с применением более точных и, соответственно, более сложных моделей сети и ее элементов. Указанные исследования, как правило, выполняются с использованием моделей кабельных линий, не учитывающих зависимость их продольных параметров от частоты, что в ряде случаев приводит к существенным погрешностям в оценке значений электрических величин переходного процесса. Поэтому задача повышения точности применяемых при аналитических расчетах и моделировании на ЭВМ математических моделей кабельных линий 6–10 кВ, прежде всего, в части учета частотных зависимостей их продольных параметров актуальна. В рассматриваемых сетях основное применение получили трехжильные кабели, поэтому ниже предлагается методика определения частотных зависимостей собственных и взаимных индуктивностей для кабелей данного типа.

Уравнения элементарного участка трехжильного кабеля длиной dx и задачи исследования. Схематичное изображение сечения трехжильного кабеля и одной из его жил показано на рис. 1, а, б.

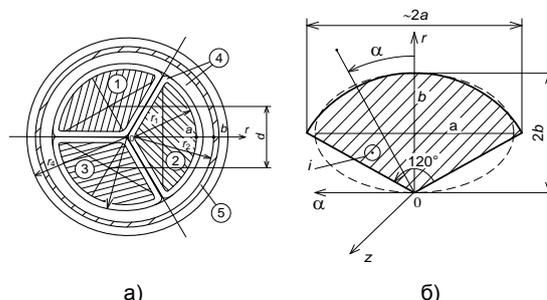


Рис. 1. Основные элементы конструкции трехжильного кабеля 6–10 кВ (а) и форма сечения одной из его жил (б): 1, 2, 3 – жилы; 4 – изоляция; 5 – оболочка; a , b – полуоси эллипса; r , α , z – цилиндрические координаты точки наблюдения

Для мгновенных токов i_1 , i_2 , i_3 , направленных от генератора к нагрузке, т.е. вдоль оси z цилиндрической системы координат (рис. 1, б), и обратного тока в оболочке $-(i_1 + i_2 + i_3)$ индуктивные составляющие напряжения в фазах кабеля для элементарного участка длиной dx рассчитываются по следующим формулам:

$$u_1 = \left(\frac{1}{2} L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{12} \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{2} M_{13} \frac{di_3}{dt} \right) dx, \quad (1)$$

$$u_2 = \left(\frac{1}{2} L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{2} M_{23} \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{2} M_{21} \frac{di_1}{dt} \right) dx, \quad (2)$$

$$u_3 = \left(\frac{1}{2} L_3 \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{2} M_{31} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{32} \frac{di_2}{dt} \right) dx. \quad (3)$$

Индуктивное падение напряжения в оболочке участка кабеля длиной dx составляет

$$u_0 = - \left(\frac{1}{2} L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{2} L_3 \frac{di_3}{dt} \right) dx. \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(4) L_1 , L_2 , L_3 – удельные (погонные, на единицу длины) индуктивности жил, каждая из которых обусловлена магнитным потоком между жилой и оболочкой, внутренними индуктивностями самих жил и внутренней индуктивностью оболочки:

$$L_k = L_{ke} + L_{ki} + L_0, \quad (k = 1, 2, 3), \quad (5)$$

где L_{ke} – внешняя индуктивность k -й жилы; L_{ki} – ее внутренняя индуктивность; L_0 – внутренняя индуктивность оболочки.

Через $M_{12} = M_{21}$; $M_{13} = M_{31}$; $M_{23} = M_{32}$ в уравнениях (1)–(3) обозначены удельные взаимные индуктивности жил, обусловленные магнитными потоками между жилами, т.е. это индуктивности двухпроводных линий, образованных жилами 1–2, 2–3, 3–1. Каждая из этих

взаимных индуктивностей также имеет внешнюю и внутреннюю составляющие M_e и M_i .

При расчетах переходных процессов при ОЗЗ необходимо знать удельные индуктивности контура «фаза – фаза» («жила – жила») и контура «фаза – земля» («жила – оболочка») или контуров прямой (обратной) и нулевой последовательности, используемые для определения параметров схем замещения кабельных линий [7, 11] или для задания параметров их моделей в системах моделирования Simulink и др. Указанные индуктивности и их частотные характеристики определяются индуктивностями $L_k(\omega)$ и $M_j(\omega)$.

Известно, что единый сложный переходный процесс при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения условно можно разделить на две основные стадии [8]. Продолжительность первой стадии, связанной с разрядом емкостей поврежденной фазы, в кабельных сетях 6–10 кВ составляет десятки и сотни микросекунд, а частоты разрядных составляющих переходных токов ОЗЗ – от единиц до десятков и сотен килогерц. Для второй стадии, связанной с дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз и длящейся до 3–5 мс, характерны частоты колебаний от сотен герц до единиц килогерц.

Таким образом, в общем случае необходимо определить частотные характеристики собственных и взаимных индуктивностей кабельных линий $L(\omega)$, $M(\omega)$ в диапазоне частот f от сотен герц до сотен килогерц.

Расчет частотной характеристики собственной индуктивности оболочки $L_o(\omega)$. Для цилиндрической оболочки с радиусами r_3 и r_4 (рис. 1,а) при постоянном токе и низкой частоте удельная (на единицу длины) индуктивность может быть определена по формулам, приведенным в [9, 10]:

$$L_{об}(0) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{r_3^4}{r_4^2 - r_3^2} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{r_4^2 - 3 \cdot r_3^2}{4(r_4^2 - r_3^2)} \right), \quad (6)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Частотную характеристику индуктивности оболочки $L_o(\omega)$ целесообразно определять совместно с ее активным сопротивлением $r_{об}(\omega)$, необходимым, как и индуктивность, для построения модели кабеля. Для определения $L_{об}(\omega)$ и $R_{об}(\omega)$ воспользуемся формулой, приведенной в [10]:

$$\underline{Z}(\omega) = R_{об}(\omega) + j\omega L_{об}(\omega) = \frac{k\rho}{2\pi r_4} \cdot \frac{I_0(kr_4)H_1^{(1)}(kr_3) - H_0^{(1)}(kr_4)I_1(kr_3)}{I_1(kr_4)H_1^{(1)}(kr_3) - H_1^{(1)}(kr_4)I_1(kr_3)}, \quad (7)$$

где $k = \sqrt{-j \frac{\omega \mu_0}{\rho}}$; $\rho = \frac{1}{\gamma} = 0,028 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; $I_0(\zeta)$,

$I_1(\zeta)$ – функции Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядков; $H_0^{(1)}(\zeta)$ и $H_1^{(1)}(\zeta)$ – функции Ханкеля 1-го рода нулевого и первого порядков.

Расчет частотной характеристики внутренней индуктивности жилы кабеля $L_{ki}(\omega)$. Геометрически сечение жилы кабеля достаточно точно аппроксимируется эллипсом с полуосями a и b (рис. 1,б). Согласно [9, 10], при постоянном токе внутренняя индуктивность жилы составляет

$$L_{ki}(0) = \frac{\mu_0}{8\pi} = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}. \quad (8)$$

При резко выраженном поверхностном эффекте, т.е. в случаях, когда эквивалентная глубина проникновения $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \gamma}} \ll a, b$, расчет производится по формуле

$$L_{ki}(\omega) = \frac{1}{\pi^2 a} \sqrt{\frac{\mu_0}{2\omega \gamma}} K(k^2), \quad (9)$$

где K – полный эллиптический интеграл первого рода с модулем $k = b/a$.

Формула (9) дает достаточно точные результаты при частотах $f > 10$ кГц. К сожалению, формула (9) не применима при частотах $50 < f < 5000$ Гц, наиболее важных для ряда технических приложений, например, для решения задач, связанных с разработкой устройств защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов.

Для получения приближенного решения рассматриваемой задачи на основе теоремы о потоке электромагнитной энергии [11] будем рассматривать секторную жилу кабеля как жилу кругового сечения, периметр которой совпадает с периметром аппроксимирующего сектор эллипса (рис. 1,б). Последнее имеет место при ее радиусе [12]

$$r_3 = \frac{3}{2} \frac{a+b}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{ab}. \quad (10)$$

В этом случае при $\Delta \ll r_3$ индуктивность жилы вычисляется по формуле [12]

$$L_{ki}(\omega) = \frac{1}{\omega} \frac{1}{2\pi r_3 \Delta \gamma} = \frac{1}{2\pi r_3} \sqrt{\frac{\mu_0}{2\omega \gamma}}. \quad (11)$$

Значения индуктивности, определенные по (11) при $f \geq 10$ кГц, отличаются от найденных по формуле (9) значений лишь в третьем знаке. Поэтому применение формулы (11) во всем расчетном диапазоне частот обеспечивает при частотах $f \geq 10$ кГц погрешности, не превышающие с единиц процентов.

При $r_3 \approx \Delta$ (слабовыраженный поверхностный эффект) можно использовать известную методику расчета сопротивлений и индуктивностей круглых проводов [9].

Расчет внешней индуктивности жилы кабеля $L_{ke}(\omega)$. Эта индуктивность является внешней индуктивностью двухпроводной линии жила–оболочка. В силу того, что не существует силовых магнитных линий, полностью примыкающих к поверхностям электродов, расчет точного значения M_0 может быть выполнен лишь при расчете магнитного поля

всей системы жила – промежутка – оболочка (рис. 2).

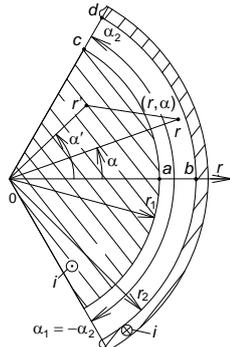


Рис. 2. Геометрические характеристики промежутка жила–оболочка

Ограничиваясь рассмотрением поля в промежутке, определим индуктивность при постоянном токе $L_{ке}(0)$ по формуле

$$L_{ке}(0) = \frac{\Phi_{ср}}{i} = \frac{1}{i} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \Phi(\alpha) d\alpha = \frac{1}{i} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{A(r_1, \alpha) - A(r_2, \alpha)}{\alpha_2 - \alpha_1} d\alpha, \quad (12)$$

где $A = A_z(r, \alpha)$ – векторный магнитный потенциал в промежутке жила–оболочка; $\Phi_{ср}$ – среднее значение магнитного потока.

Так как при постоянном токе оболочка не создает магнитного поля в промежутке (по закону полного тока), для $A_z(r, \alpha)$ справедливо выражение

$$A_z = \frac{\mu_0 \delta}{2\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{r'}^{\alpha_2(r')} \ln \frac{r'}{R(r', \alpha')} dr' d\alpha' + C = -\frac{\mu_0 \delta}{2\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} r' dr' \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \ln \left[r^2 \left(1 + \left(\frac{r'}{r} \right)^2 - 2 \frac{r'}{r} \cos(\alpha - \alpha') \right) \right] d\alpha' + C, \quad (13)$$

где $\delta = \frac{i}{S_{ж}} = \frac{i}{0,5 \cdot r_1^2 \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)}$ – плотность тока;

$$R(r', \alpha') = \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\alpha - \alpha')}.$$

Используя разложение [13]

$$\ln \left(1 + \left(\frac{r'}{r} \right)^2 - 2 \frac{r'}{r} \cos(\alpha - \alpha') \right) = -2 \cdot \left[\frac{r'}{r} \cos(\alpha - \alpha') + \frac{1}{2} \left(\frac{r'}{r} \right)^2 \cos[2(\alpha - \alpha')] + \frac{1}{3} \left(\frac{r'}{r} \right)^3 \cos[3(\alpha - \alpha')] + \dots + \frac{1}{k} \left(\frac{r'}{r} \right)^k \cos[k(\alpha - \alpha')] \right], \quad (14)$$

из (16) получим

$$A_z(r, \alpha) = \frac{\mu_0 \delta S_{ж}}{2\pi} \ln \frac{1}{r} + \frac{\mu_0 \delta}{2\pi} 2r_1^2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \left(k \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right)}{(k+2)k^2} \left(\frac{r_1}{r} \right)^k \times \cos \left[k \left(\alpha - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) \right] + C. \quad (15)$$

Постоянная C в (16)–(18) определяется из условия $A_z(r = r_2) = 0$:

$$C = -\frac{\mu_0 \delta}{2\pi} \left[S_{ж} \ln \frac{1}{r_2} + 2r_1^2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \left(k \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right)}{(k+2)k^2} \times \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^k \cos \left[k \left(\alpha - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) \right] \right]. \quad (16)$$

С учетом (15) и (16) магнитный поток в пространстве между жилой и оболочкой $\Phi(\alpha)$ в (12) рассчитывается по формуле

$$\Phi(\alpha) = A_z(r_1, \alpha) = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\mu_0 i}{\pi S_{ж}} r_1^2 \sum_{k=1}^{\infty} \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right)^k \frac{\sin(k\alpha_2)}{(k+2)k^2} \cos(k\alpha). \quad (17)$$

Практические расчеты для трехжильных кабелей 6–10 кВ показали, что без существенных погрешностей в (17) можно ограничиться первым членом разложения:

$$\Phi(\alpha) \approx \frac{\mu_0 i}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\mu_0 i}{\pi S_{ж}} r_1^2 \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right) \frac{\sin(60^\circ)}{3} \cos(\alpha). \quad (18)$$

С учетом (18) из (12) получим

$$L_{ке}(0) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} + 0,239 \frac{\mu_0}{\pi S_{ж}} r_1^2 \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right). \quad (19)$$

Полученное выражение может быть использовано для расчета внешней индуктивности $M_{ке}$ только при постоянном токе, но при частотах, когда отсутствует явно выраженный поверхностный эффект.

Расчет внешней индуктивности $L_{ке}(\omega)$ при резко выраженном поверхностном эффекте ($\Delta \ll r_3$). Для расчета внешней индуктивности $L_{ке}(\omega)$ при резко выраженном поверхностном эффекте ($\Delta \ll r_3$) используются формулы (12)–(19) и расчетная схема, приведенная на рис. 3.

Используя метод наложения, магнитный поток Φ_{Δ} (рис. 3), определяющий индуктивность $M_0(\omega)$, можно представить в виде алгебраической суммы двух потоков Φ' и Φ'' (рис. 4, а, б).

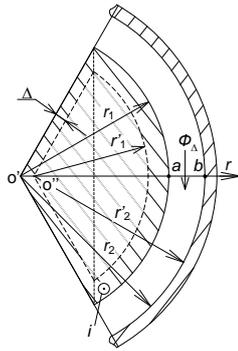


Рис. 3. Схема для расчета магнитного потока в промежутке жила-оболочка при резко выраженном поверхностном эффекте

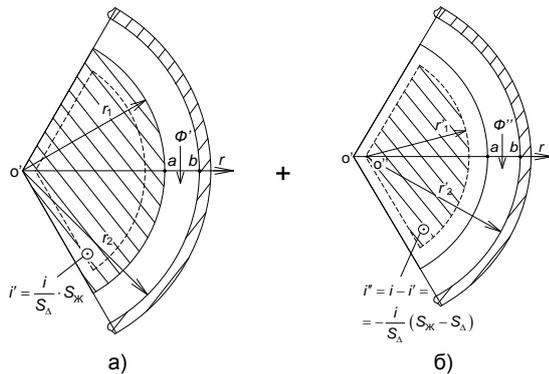


Рис. 4. Схема использования метода наложения для расчета магнитного потока в промежутке жила-оболочка: а – Φ'; б – Φ''

Для этого случая:

$$\begin{aligned}
 r'_1 &= r_1 - 2\Delta; \\
 r'_2 &= r_2 - \Delta; \\
 S_{ж} &= \frac{1}{2} r_1^2 (\alpha_2 - \alpha_1) = \frac{1}{3} \pi r_1^2; \\
 S_{\Delta} &= \Delta p = 2 \Delta r_1^2 \left(1 + \frac{\pi}{3} \right).
 \end{aligned} \tag{20}$$

Магнитные потоки Φ' и Φ'' определяются по следующим выражениям:

$$\Phi' = L'_{ке}(0) i' = L'_{ке}(0) i \frac{S_{ж}}{S_{\Delta}}; \tag{21}$$

$$\Phi'' = L''_{ке}(0) i'' = -L''_{ке}(0) i \frac{S_{ж} - S_{\Delta}}{S_{\Delta}}, \tag{22}$$

где $L'_{ке}(0)$ определяется по (19), а $L''_{ке}(0)$ – по выражению, являющемуся вариантом формулы (19):

$$\begin{aligned}
 L''_{ке}(0) &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_2 - \Delta}{r_1 - \Delta} + \\
 &+ 0,239 \frac{\mu_0}{\pi} \frac{(r_1 - 2\Delta)^2}{S_{ж} - S_{\Delta}} \left(1 - \frac{r_1 - \Delta}{r_2 - \Delta} \right).
 \end{aligned} \tag{23}$$

В результате получим

$$L_{ке}(\omega) = \frac{\Phi' + \Phi''}{i} = L'_{ке}(0) \frac{S_{ж}}{S_{\Delta}} - L''_{ке}(0) \left(\frac{S_{ж}}{S_{\Delta}} - 1 \right). \tag{24}$$

Расчеты, выполненные по формулам (19), (23), (24) для ряда исполнений трехжильных кабелей, показали, что значения $L'_{ке}(0)$ и

$L''_{ке}(0)$ отличаются только в 3-м знаке, поэтому приближенно (с точностью до единиц процентов) можно принять $L_{ке}(\omega) \approx L'_{ке}(0)$, т.е. $L_{ке}(\omega)$ практически не зависит от частоты.

Расчет коэффициентов взаимоиנדукции между жилами кабеля $M(\omega)$. Расчет $M(\omega)$ удобно выполнить через индуктивности петель (контуров) «жила-оболочка» и «жила-жила». Для коэффициентов взаимоиנדукции $M_{12} = M_{21}$ имеет место следующее равенство [13]:

$$M_{12} = M_{21} = \frac{1}{2} (L_1 + L_2 - L_{12}). \tag{25}$$

Индуктивности L_1 и L_2 для постоянного тока и низких частот определены выше: $L_1 = L_2 = L_{ке}(0)$ Гн/м. Для определения индуктивности петли «жила-жила» аппроксимируем жилы кабеля эллипсоидами (рис. 5) с полуосями a, b и применим формулу для двухпроводной линии с эллиптическими проводниками [10]:

$$L_{12} = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{2d}{a+b} + \frac{1}{4} + \Delta \right), \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
 \text{где } \Delta &= \frac{\delta^2}{4} \cos 2\nu - \frac{1}{32} \delta^4 (3 + 2 \cos 4\nu) + \\
 &+ \frac{5}{192} \delta^6 (6 \cos 2\nu + \cos 6\nu); \\
 \delta &= \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{d}}.
 \end{aligned}$$

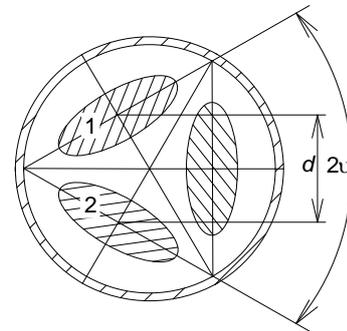


Рис. 5. К расчету коэффициентов взаимоиנדукции для жил кабеля

Практически тот же результат получается при применении более простой формулы двухпроводной линии с $r_{пп} = \frac{a+b}{2}$ (рис. 1,б).

Для переменного тока при резко выраженном поверхностном эффекте следует использовать результаты, полученные при расчете $L_{кi}(\omega)$, и для расчета внутренней индуктивности проводов применить одну из формул (9) или (11).

Заключение

Предложенная методика учета частотной зависимости индуктивностей трехфазных силовых кабелей является основой для повышения точности математических моделей ка-

бельных линий, используемых при расчетах переходных процессов, возникающих при однофазных замыканиях на землю и других коммутациях в электрических сетях среднего напряжения.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.
2. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания на землю в распределительных сетях под рабочим напряжением // Электричество. – 2005. – № 6. – С. 9–19.
4. Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Электричество. – 1991. – № 10. – С. 58–61.
5. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001.
6. Шуин В.А., Фролова О.В., Сарбеева О.А., Чугрова Е.С. Математические модели электрических сетей среднего напряжения для исследования дуговых прерывистых замыканий на землю // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 6. – С. 81–89.
7. Шуин В.А., Сарбеева О.А., Шагурина Е.С., Ганджаев Д.И. Особенности использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 32–41.
8. Шуин В.А., Сарбеева О.А., Чугрова Е.С. Токовые защиты от замыканий на землю. Исследование динамических режимов функционирования // Новости Электротехники. Информационно-справочное издание. – 2010. – № 2(62). – С. 36–40.
9. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.
10. Слышалов В.К., Шуин В.А., Киселева Ю.А., Ганджаев Д.И. Модели волновых процессов в воздушных линиях 6–10 кВ для решения задачи определения места

Слышалов, Владимир Константинович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры электрических систем,
телефон (4932) 26-99-21.

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru

Куванов Александр Владимирович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
ассистент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06.

Воробьева Екатерина Андреевна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06.

Филатова Галина Андреевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: fgala90@mail.ru

однофазного замыкания на землю // Вестник ИГЭУ. – 2004. – Вып. 6. – С. 47–53.

11. Шимони К. Теоретическая электротехника: пер. с нем. / под ред. К.М. Поливанова. – М.: Мир, 1971.

12. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 2. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008.

13. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – СПб.: Лань, 2009.

References

1. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with isolated neutral and compensated capacitive currents]. Moscow, Energiya, 1971.
2. Popov, I.N., Lachugin, V.F., Sokolova, G.V. *Reley-naya zashchita, osnovannaya na kontrole perekhodnykh protsessov* [Relay protection based on transients control]. Moscow, Energoatomizdat, 1986.
3. Kachesov, V.E. *Elektrichestvo*, 2005, no. 6, pp. 9–19.
4. Shuin, V.A. *Elektrichestvo*, 1991, no. 10, pp. 58–61.
5. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Earth fault protection in 6–10 kV cable networks]. Moscow, NTF «Energo-progress», «Energetik», 2001.
6. Shuin, V.A., Frolova, O.V., Sarbeeva, O.A., Chugrova, E.S. *Vestnik IGEU*, 2005, issue 6, pp. 81–89.
7. Shuin, V.A., Sarbeeva, O.A., Shagurina, E.S., Gandzhave, D.I. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 1, pp. 32–41.
8. Shuin, V.A., Sarbeeva, O.A., Chugrova, E.S. *Novosti ElektroTehniki. Informatsionno-spravochnoe izdanie*, 2010, no. 2(62), pp. 36–40.
9. Kalantarov, P.L., Tseytlin, L.A. *Raschet induktivnos-tey: spravochnaya kniga* [Inductance calculation: a reference book]. Leningrad, Energoatomizdat, 1986.
10. Slyshalov, V.K., Shuin, V.A., Kiseleva, Yu.A., Gandzhave, D.I. *Vestnik IGEU*, 2004, issue 6, pp. 47–53.
11. Shimoni, K. *Teoreticheskaya elektrotehnika* [Theory of electrical engineering]. Moscow, Mir, 1971.
12. Smirnov, V.I. *Kurs vysshey matematiki* [A course of higher mathematics]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg, 2008.
13. Dvayt, G.B. *Tablitsy integralov i drugie matematicheskie formuly* [Tables of integrals and other mathematical formulas]. Saint-Petersburg, Lan', 2009.