

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ СМЕЖНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В.П. ЗАКАРЮКИН, А.В. КРЮКОВ

Иркутский государственный университет путей сообщения

Предложена уточненная методика расчета режимов сложных электроэнергетических систем в фазных координатах, позволяющая корректно определять взаимные электромагнитные влияния в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона. Для ближней и дальней зон используются аппроксимирующие выражения, а для промежуточной – прямое вычисление рядов, к которым сводится интеграл.

Из-за сложности учета взаимовлияний проводов многопроводной системы требуется применение фазных координат. Такой возможностью обладает разработанный авторами программный комплекс Fazonord, который позволяет заменить длинную многопроводную линию цепочечной схемой электрически коротких отрезков линии. Поскольку в программном комплексе при расчете режима формируется решетчатая схема замещения многопроводной системы путем использования выражений для собственных и взаимных сопротивлений отдельных проводов, то требуется алгоритм реализации формул Карсона, приемлемый с точки зрения охвата ближней, промежуточной и дальней зон и обладающий достаточным быстродействием для проведения многократных расчетов.

Методика реализована в программном комплексе Fazonord, разработанном в ИрГУПСе, с охватом ближней, промежуточной и дальней зон. Программный комплекс позволяет проводить расчеты режимов сложных электроэнергетических систем в фазных координатах и корректно определять наведенные напряжения с учетом высших гармоник при различных величинах ширины сближения смежных ЛЭП и значениях сопротивления земли.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, взаимные электромагнитные влияния линий электропередачи, наведенные напряжения, интеграл Карсона.

Введение

Взаимное электромагнитное влияние смежных линий электропередачи (ЛЭП) (включая и тяговые сети электрифицированных железных дорог) создает ряд проблем при эксплуатации и обслуживании ЛЭП и подключенного к ним оборудования. При ширине сближения примерно до 100 м существенную роль играет емкостная связь между проводами смежных линий. На больших расстояниях сказывается в основном индуктивное (магнитное по терминологии [1]) влияние. Наведенное напряжение емкостной связи определяется уровнями напряжений влияющей линии и значительно при незаземленных проводах ЛЭП, подверженной влиянию. Магнитное влияние определяется токами влияющей линии. Ввиду вариаций токов наводимые напряжения обычно находят расчетным путем с рассмотрением пакета смежных линий как единой многопроводной системы и использованием сопротивлений взаимоиндуктивной связи между проводами [2...7]. В последнее время появилось новые работы [8, 9] с

использованием решения Карсона [10], в которых предлагается усложненный алгоритм расчета взаимных сопротивлений, позволяющий учитывать сопротивление земли при определении наведенных напряжений.

В настоящей статье предлагается уточненная методика расчета режимов сложных электроэнергетических систем в фазных координатах, базирующаяся на разработках [4], позволяющая корректно определять взаимные электромагнитные влияния в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона.

Постановка задачи. Понятия взаимной индуктивности и сопротивления взаимоиндуктивной связи предполагают мгновенную передачу изменений режима отдельных проводов по всей многопроводной системе. При определении взаимной индуктивности проводов рассматриваются контуры провод – земля. Для синусоидальных процессов в линейной системе с неподвижными объектами взаимная индуктивность дает пропорциональную зависимость намагничивающего тока в контуре, создающем магнитное поле, и наводимой в другом контуре ЭДС: $\dot{E} = -j\omega M_{ik} \dot{I} = -Z_{ik} \dot{I}$, где Z_{ik} – сопротивление взаимоиндуктивной связи между контурами i и k на 1 км протяженности системы проводов; ω – круговая частота.

Формулы Карсона [10] для собственных и взаимных сопротивлений проводов позволяют обойти трудность цепной постановки задачи путем определения сопротивлений через осевую составляющую напряженности электрического поля при корректном решении уравнений Максвелла. Они дают возможность рассчитать собственное внешнее сопротивление прямолинейного провода над плоской поверхностью однородной земли, а также взаимное сопротивление двух проводов с учетом возврата токов через землю. Последнее обстоятельство прямо определено названием статьи («*Wave propagation in overhead wires with ground return*»), и об этом дополнительно указано в сноске на с. 544 [10]. В статье приведены аппроксимации общего решения для ближней и дальней зон (соответствующий параметр Карсона $r \leq 0,25$ и $r \geq 5$), которые не применимы для промежуточной зоны. Для этой зоны можно использовать графики, приведенные на рис. 2 и 3 статьи [10], либо прямое вычисление рядов, к которым сводится интеграл. В работе Л.С. Перельмана [11] указано, что для достижения высокой точности вычислений достаточно 14 членов ряда, что не представляет особых сложностей. Прямое использование таблиц, представленных в [11], для вычислительных процедур затруднительно.

Проблема учета запаздывания в распространении электромагнитного поля обостряется при расчетах влияний на гармониках [7]. При этом возникает необходимость использования решения Карсона для промежуточной и дальней зон, а в качестве уравнений установившегося режима необходимо использовать уравнения длинной линии. Часто используемая модель с эквивалентным обратным проводом (ЭОП) является интерпретацией решения Карсона для ближней зоны и не требует дополнительного учета токов в земле или обратного тока. Пара контуров для взаимной индуктивности при этом образуются первым проводом с эквивалентным обратным проводом и вторым проводом с таким же эквивалентным обратным проводом нулевого потенциала.

В связи со сложностью учета взаимовлияний проводов многопроводной системы требуется применение фазных координат. Такой возможностью обладает разработанный авторами программный комплекс *Fazonord* [12], который позволяет эквивалентировать длинную многопроводную линию цепочечной схемой электрически коротких отрезков линии. Поскольку в программном комплексе при расчете режима формируется решетчатая схема замещения многопроводной системы путем использования выражений для собственных и взаимных сопротивлений отдельных

проводов, то требуется алгоритм реализации формул Карсона, приемлемый с точки зрения охвата ближней, промежуточной и дальней зон и обладающий достаточным быстродействием для проведения многократных расчетов, проводимых, например, для учета перемещения тяговых нагрузок железнодорожного транспорта.

Методика определения взаимных индуктивных сопротивлений. Собственное внешнее сопротивление прямолинейного провода малого радиуса и взаимное сопротивление двух параллельных проводов для плоской однородной земли вычисляются по формулам Карсона [10], в которых метод зеркальных отображений скорректирован для условий конечной проводимости земли:

$$\underline{Z}_{ik} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{r_{ik}'}{r_{ik}} + \underline{E}_{ik} \right) = j 1,2566 \cdot 10^{-6} f \left(\ln \frac{r_{ik}'}{r_{ik}} + \underline{E}_{ik} \right), \text{ Ом/м} \quad (1)$$

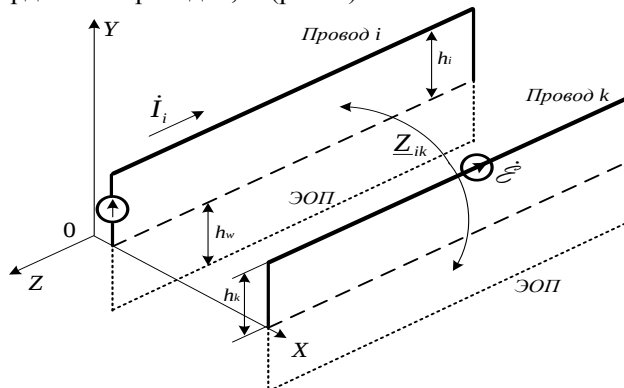
где ω – круговая частота, с^{-1} ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; r_{ik}' – расстояние от провода i до зеркального изображения провода k , м; r_{ik} – расстояние между проводами i и k , м. При пренебрежении токами смещения в земле второе слагаемое в скобках, которое дает добавку за счет конечной проводимости земли, определяется формулой следующего вида:

$$\begin{aligned} \underline{E}_{ik} = & 0,5 - \ln(\lambda r) - j \frac{\pi}{4} - \\ & - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(r/2)^{2n} e^{jn\pi/2}}{n!(n+1)!} \times \left[\left(\ln(\lambda r) - m_n + j \frac{\pi}{4} \right) \cos(2n\theta) - \theta \sin(2n\theta) \right] - \\ & - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{r^{2n-1} e^{j(2n-1)\pi/4} \cos[(2n-1)\theta]}{1^2 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \dots (2n-1)^2 \cdot (2n+1)}; \end{aligned} \quad (2)$$

где $m_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n+1} - \frac{1}{2(n+1)}$; $r = r_{ik}' \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}} = 2,8099 \cdot 10^{-3} \cdot r_{ik}' \sqrt{\frac{f}{\rho}}$;

f – циклическая частота, Гц; $r_{ik}' = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i + y_k)^2}$; ρ – удельное сопротивление земли, Ом·м; $\lambda = 0,890536209$; $\theta = \arctg \frac{|x_i - x_k|}{y_i + y_k}$.

Направление оси Y декартовой системы координат выбрано вертикально вверх, ось X перпендикулярна осям проводов так, что ось Z направлена противоположно положительному направлению тока. Начало координат лежит на поверхности земли; (x_i, y_i) , (x_k, y_k) – координаты проводов, м (рис. 1).



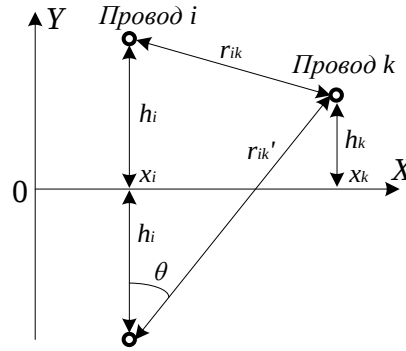


Рис. 1. Схема взаимного расположения влияющего и смежного проводов

Формула (2) при $r \leq 0,25$ с достаточной точностью аппроксимируется выражением следующего вида [2]:

$$\underline{E}_{ik} = -0,077216 - \ln \frac{r}{2} + \frac{\sqrt{2}}{3} r \cos \theta - j \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\sqrt{2}}{3} r \cos \theta \right).$$

В статье Карсона [10] для этой зоны используется немного более усложненный вариант:

$$\underline{E}_{ik} = -0,077216 - \ln \frac{r}{2} + \frac{\sqrt{2}}{3} r \cos \theta - j \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\sqrt{2}}{3} r \cos \theta + \frac{r^2}{8} \left[\left(0,6728 - \ln \frac{r}{2} \right) \cos 2\theta + \theta \sin 2\theta \right] \right]. \quad (3)$$

Формула (1) в терминах составляющих P и Q статьи Карсона [10] может быть представлена так:

$$\underline{Z}_{ik} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{r_{ik}'}{r_{ik}} - 2jP(p,q) + 2Q(p,q) \right]; \quad \underline{E}_{ik} = -2jP(p,q) + 2Q(p,q).$$

При больших значениях $r \geq 5$ используется следующее выражение [2, 3]:

$$\underline{E}_{ik} = \frac{2}{r} \left(\cos \theta e^{-j\pi/4} + j \frac{\cos 2\theta}{r} + \frac{\cos 3\theta}{r^2} e^{-j3\pi/4} - \frac{3\cos 5\theta}{r^4} e^{-j5\pi/4} \right);$$

$$\underline{E}_{ik} = \frac{\sqrt{2}}{r} \left[(1-j) \cos \theta + j \frac{\sqrt{2} \cos 2\theta}{r} - (1+j) \frac{\cos 3\theta}{r^2} + (1-j) \frac{3\cos 5\theta}{r^4} \right]. \quad (4)$$

При $i=k$ и $r \leq 0,2$ выражение (1) соответствует собственному внешнему сопротивлению провода [2]:

$$\underline{Z}_{\text{внеш}} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{r_{ii}} \frac{2}{\gamma} \sqrt{\frac{e\rho}{\omega\mu_0}} \right) =$$

$$= \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1,8514}{r_{ii}} \sqrt{\frac{\rho}{\omega\mu_0}} \right), \text{ Ом/м}, \quad (5)$$

где r_{ii} – радиус провода, м; $\gamma = 1,78107242$ – постоянная Эйлера; $\ln \gamma = 0,577215665$; $e = 2,718281828$ – основание натурального логарифма. Второй сомножитель под знаком логарифма можно рассматривать как некоторую эквивалентную глубину обратного

провода, которая при низких частотах обычно значительно больше высоты провода над землей:

$$h_{\text{эКВ}} = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \text{ м},$$

где f – циклическая частота, Гц. Выражение (5) учитывает переменное магнитное поле тока провода и соответствующее ему распределение обратного тока в земле.

Аналогичное формуле (5) выражение для расчета взаимного сопротивления в ближней зоне следует из выражения (1) при $i \neq k$ и $r \leq 0,2$ [2]:

$$\underline{Z}_{ik} = \frac{\omega \mu_0}{8} + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1,85}{r_{ik}} \sqrt{\frac{\rho}{\omega \mu_0}} \right), \text{ Ом/м}, \quad (6)$$

где $r_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$ – расстояние между проводами i и k , м.

Для численной реализации целесообразно преобразовать формулу (2):

$$\begin{aligned} \underline{E}_{ik} = & 0,5 - \ln(\lambda r) - j \frac{\pi}{4} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(r/2)^{2n}}{n!(n+1)!} \left[\cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right] \times \\ & \times \left[[\ln(\lambda r) - m_n] \cos(2n\theta) - \theta \sin(2n\theta) + j \frac{\pi}{4} \cos(2n\theta) \right] - \\ & - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{r^{2n-1} \cos[(2n-1)\theta]}{1^2 \cdot 3^2 \cdot \dots \cdot (2n-1)^2 \cdot (2n+1)} \left\{ \cos\left[\frac{(2n-1)\pi}{4}\right] + j \sin\left[\frac{(2n-1)\pi}{4}\right] \right\}. \quad (7) \end{aligned}$$

Для сокращения вычислительных процедур можно использовать следующие рекуррентные соотношения:

$$\begin{aligned} \sin(k+1)\theta &= C_1 \sin k\theta + S_1 \cos k\theta, \\ \cos(k+1)\theta &= C_1 \cos k\theta - S_1 \sin k\theta, \quad S_1 = \sin \theta, \quad C_1 = \cos \theta; \\ R_n &= \frac{(r/2)^{2n}}{n!(n+1)!} = R_{n-1} \frac{(r/2)^2}{n(n+1)}; \quad m_n = m_{n-1} + \frac{1}{2(n+1)} + \frac{1}{2n}; \quad m_1 = 1,25; \\ T_n &= \frac{r^{2n-1}}{1^2 \cdot 3^2 \cdot \dots \cdot (2n-1)^2 \cdot (2n+1)} = T_{n-1} \frac{r^2}{(2n-1) \cdot (2n+1)}. \end{aligned}$$

Для собственного внешнего сопротивления $r = 5,61985 \cdot 10^{-3} h_i \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho}}$, $\theta = 0$.

Формулы (1...7) реализованы в версии 2,32 комплекса *Fazonord* [12] с охватом ближней, промежуточной и дальней зон. Программный комплекс позволяет проводить расчеты режимов сложных ЭЭС в фазных координатах и корректно определять наведенные напряжения с учетом высших гармоник при различных величинах ширины сближения смежных ЛЭП и значениях сопротивления земли.

Результаты моделирования. В качестве эталона для проверки адекватности взяты таблицы статьи Перельмана [11]. В табл. 1 приведены результаты сопоставления расчетов ряда (7) программным комплексом *Fazonord* и данных статьи Перельмана для частоты 50 Гц, удельной проводимости земли 100 Ом·м и количества членов ряда (7), равном 14, за исключением последней строки таблицы, где для стабилизации результатов расчета потребовалось 55 членов ряда. В таблице представлено 4 характерных значений параметра r .

Таблица 1

Сопоставление расчетов интеграла Карсона с табличными данными

№	Расчет				По статье Перельмана [3]						Различие, %	
					Нижнее значение		Верхнее значение		Линейная интерполяция			
	r	$\text{Re}(F_{ik})$	$\text{Im}(F_{ik})$	$\theta, ^\circ$	r	$\theta, ^\circ$	r	$\theta, ^\circ$	$\text{Re}(F_{ik})$	$\text{Im}(F_{ik})$	$\text{Re}(F_{ik})$	$\text{Im}(F_{ik})$
1	0,0827	3,14601	0,75016	10,00	0,08	10	0,09	10	3,14738	-0,75014	0,043	-0,003
2	0,1267	2,72013	0,74747	50,00	0,12	50	0,13	50	2,72086	-0,74744	0,027	-0,004
3	0,9354	0,79383	0,61159	85,00	0,93	85	0,94	85	0,79389	-0,61156	0,007	-0,006
4	6,0010	0,00198	0,06039	89,22	6,00	85	6,00	90	0,00198	-0,06024	-0,020	-0,242

Различия расчетов и данных таблицы не превышает сотых долей процента, что согласуется с точностью представления данных в работе [11]. В последней строке таблицы различие в 0,2 % также может быть связано с точностью представления данных [11], где в данном случае представлены две-три значащих цифры.

Таким образом, расчеты ряда (7), реализованные в комплексе Fazonord, согласуются с известными результатами.

Заключение. Предложена уточненная методика расчета режимов сложных электроэнергетических систем в фазных координатах, позволяющая корректно определять взаимные электромагнитные влияния в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона. Для ближней и дальней зон используются аппроксимирующие выражения, а для промежуточной – прямое вычисление рядов, к которым сводится интеграл.

Методика реализована в программном комплексе Fazonord, разработанном в ИргУПСе, с охватом ближней, промежуточной и дальней зон. Программный комплекс позволяет проводить расчеты режимов сложных электроэнергетических систем в фазных координатах и корректно определять наведенные напряжения с учетом высших гармоник при различных величинах ширины сближения смежных ЛЭП и значениях сопротивления земли.

Summary

The specified calculation method of difficult electrical power systems modes in phase coordinates allowing defining correctly mutual electromagnetic influences in near, intermediate and distant zones of integral of Carson is offered. For near and far zones the approximating expressions, and for the intermediate direct calculation of ranks to which the integral is reduced are used.

Because of complexity of wires interferences in multi wire system it is required use of phase coordinates. Such opportunity the program Fazonord complex developed by authors which allows replacing the long multi wire line with the chained scheme. As in a program complex at calculation of the mode the trellised equivalent circuit of multi wire system by use of expressions for own and mutual resistance of separate wires is formed, the algorithm of Carson formulas realization accepted from the point of view of coverage of near, intermediate and distant zones and possessing sufficient speed for carrying out repeated calculations is required.

The technique is realized in the program Fazonord complex developed in Irkutsk State Transport University with coverage of near, intermediate and distant zones. The program complex allows carrying out calculations of electrical power systems modes in phase coordinates and it is correct to determine the induced voltage taking into account the high harmonics at various sizes of width of rapprochement of adjacent power lines and

values of earth resistance.

Keywords: *electrical power systems, mutual electromagnetic influences of power lines, the induced voltage, Carson's integral.*

Литература

1. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. М.: Транспорт, 1989. 134 с.
2. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272 с.
3. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. Л.: Наука, 1988. 302 с.
4. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т, 2005. 273 с.
5. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Моделирование электромагнитных влияний на смежные ЛЭП на основе расчета режимов энергосистемы в фазных координатах: монография. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2009. 120 с.
6. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 170 с.
7. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Кобычев Д.А. Математические модели для определения взаимных электромагнитных влияний в системах тягового электроснабжения. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 110 с.
8. Мисриханов М.Ш., Токарский А.Ю. Учет проводимости земли при определении ЭДС, наведенных в параллельных воздушных линиях электропередачи // Электро. 2010. №3. С. 13-18.
9. Мисриханов М.Ш., Мурзин С.Г., Седунов В.Н., Токарский А.Ю. Наведенные продольные напряжения в параллельных воздушных линиях электропередачи // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. №5(3), т. 14. С. 808-814.
10. Carson, J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Syst. Tech. J., 1926, 5, pp. 539–554.
11. Перельман Л.С. Таблицы интегралов Карсона для использования в расчетах волновых процессов в линиях с учетом земли // Известия НИИПТ. 1955. №11. С. 342-360.
12. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов» / Закарюкин В.П., Крюков А.В. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.

Поступила в редакцию

09 февраля 2015 г.

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д-р техн. наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Тел: 8(3952)638345. E-mail: zakar49@mail.ru.

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), академик Российской академии транспорта, член-корр. Российской инженерной академии, член-корр. академии наук высшей школы РФ, заслуженный энергетик РБ. Тел: 8(3952)638345. E-mail: and_kryukov@mail.ru.