

УДК 621.316.13

Д. А. Маевский, д-р техн. наук
 А. Н. Семенюг, Г. Н. Кучеренко

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПРОВОДНИКАМИ КАБЕЛЯ НА РЕЖИМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Аннотация. Разработана математическая модель распространения напряжений в проводниках кабелей с учетом электрических и магнитных связей между ними. С использованием этой модели проведены исследования искажений в трехфазной системе, возникающих из-за наличия таких связей

Ключевые слова: трехфазная система, магнитная связь, качество электрической энергии, взаимные влияния, линии с распределенными параметрами, силовые кабели

D. Maevsky, ScD.,
 A. Semenug, G. Kuchernko

INFLUENCE OF COUPLING BETWEEN THE CABLE'S CONDUCTORS ON THE OPERATION MODE OF ELECTRIC NETWORKS

Abstract. A mathematical model of the distribution voltages in the conductors with cables with the electric and magnetic connections between them. Using this model, studies carried out in three-phase distortions arising from the presence of such linkages.

Keywords: three-phase system, the magnetic coupling, power quality, mutual influence, transmission line, power cables

Д. А. Маєвський, д-р техн. наук,
 О. М. Семенюг, Г. М. Кучеренко

ВПЛИВ ВЗАЄМНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ПРОВІДНИКАМИ КАБЕЛЮ НА РЕЖИМ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Анотація. Розроблено математичну модель розповсюдження напруги в провідниках кабелів з урахуванням електричних і магнітних зв'язків між ними. З використанням цієї моделі проведені дослідження спотворень в трифазній системі, що виникають через наявність таких зв'язків

Ключові слова: трифазна система, магнітний зв'язок, якість електричної енергії, взаємні впливи, лінії з розподіленими параметрами, силові кабелі

1. Введение

Силовой электрический кабель является одним из наиболее высокоэффективных современных средств передачи и распределения электрической энергии. Как устройство для передачи электрической энергии, силовой кабель используется уже более ста лет. Кабель представляет собой один или несколько изолированных проводников в металлической или неметаллической оболочке, поверх которой в зависимости от условий прокладки и эксплуатации имеется защитное покрытие, в которое может входить ферромагнитная броня [1]. Наличие такой брони приводит к повышению напряженности электрического и магнитного полей внутри кабеля, что, в свою очередь, приводит к усилению взаимных связей проводников кабеля [2].

За счет этих связей часть электромагнитной энергии, распространяющейся по одному из проводников, может передаваться в соседний проводник, искажая режим работы системы электроснабжения. Математическая модель трех связанных линий электропередачи, а также методы расчета искажений в них получены в серии работ [3 – 5]. Однако, вид и степень таких искажений, и их влияние на искажение режимов работы электрических сетей в настоящее время практически не исследованы [6]. Поэтому изучение влияния межпроводниковых связей в кабеле на режим работы электрической сети является актуаль-

ным. В настоящей работе исследованы взаимные влияния пар проводников кабеля друг на друга. Более точные исследования двух проводников на третий могут быть получены на основании принципа наложения.

2. Математическая модель взаимных влияний между двумя проводниками

Рассмотрим систему, состоящую из двух проводников, симметрично расположенных внутри проводящего ферромагнитного экрана. Для ее участка бесконечно малой длины dx можно составить схему замещения, показанную на рис. 1.

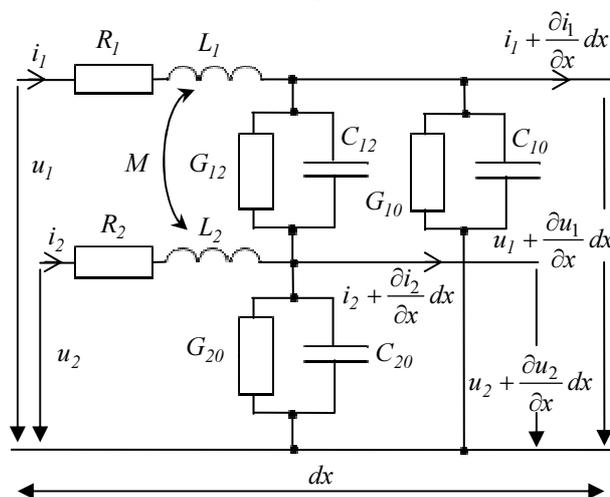


Рис. 1. Схема замещения участка кабеля

© Маевский Д.А., Семенюг А.Н.,
 Кучеренко Г.Н., 2015

На этой схеме: R_1, R_2 – собственные погонные сопротивления проводников; L_1, L_2 – их погонные индуктивности; G_{12} и C_{12} отражают наличие гальванической связи между проводниками, а погонный коэффициент взаимной индукции – наличие магнитной связи. Погонные параметры G_{10}, G_{20}, C_{10} и C_{20} отражают наличие гальванической связи между проводниками и проводящим экраном. Ток i_1 , имеющий место в начале участка, и изменяющийся по координате x со скоростью $\frac{\partial i_1}{\partial x}$, в конце участка будет иметь значение $i_1 + \frac{\partial i_1}{\partial x} dx$. Аналогичные выводы можно сделать относительно тока i_2 и напряжений u_1 и u_2 . Здесь полагается, что рассматриваемый участок находится на расстоянии x от начала кабеля.

Тогда, составив на основании законов Кирхгофа уравнения для токов и напряжений данного участка, можно получить математическую модель кабеля в виде системы уравнений (1).

Для синусоидального режима работы кабеля с одинаковыми первичными параметрами проводников ($R_1 = R_2 = R_0, L_1 = L_2 = L_0, G_{10} = G_{20} = G_0, C_{10} = C_{20} = C_0$) где:

$$G_{S1} = G_{10} + G_{12}, \quad G_{S2} = G_{20} + G_{12}, \quad C_{S1} = C_{10} + C_{12}, \quad C_{S2} = C_{20} + C_{12}.$$

$$\begin{cases} -\frac{\partial u_1}{\partial x} = L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t} + R_1 i_1 \\ -\frac{\partial u_2}{\partial x} = L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_1}{\partial t} + R_2 i_2 \\ -\frac{\partial i_1}{\partial x} = G_{S1} u_1 + C_{S1} \frac{\partial u_1}{\partial t} - G_{12} u_2 - C_{12} \frac{\partial u_2}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_2}{\partial x} = G_{S2} u_2 + C_{S2} \frac{\partial u_2}{\partial t} - G_{21} u_1 - C_{21} \frac{\partial u_1}{\partial t} \end{cases}, \quad (1)$$

Из (1) можно получить систему относительно комплексов токов и напряжений:

$$\begin{cases} -\frac{\partial \dot{U}_1}{\partial x} = \underline{Z}_0 \dot{I}_1 + \underline{Z}_M \dot{I}_2 \\ -\frac{\partial \dot{U}_2}{\partial x} = \underline{Z}_M \dot{I}_1 + \underline{Z}_0 \dot{I}_2 \\ -\frac{d \dot{I}_1}{dx} = \underline{Y}_S \dot{U}_1 - \underline{Y}_{12} \dot{U}_2 \\ -\frac{d \dot{I}_2}{dx} = -\underline{Y}_{12} \dot{U}_1 + \underline{Y}_S \dot{U}_2 \end{cases}, \quad (2)$$

где: $\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0, \underline{Z}_M = j\omega M,$
 $\underline{Y}_S = (G_0 + G_{12}) + j\omega(C_0 + C_{12}), \underline{Y}_{12} = G_{12} + j\omega C_{12}.$

Система (2) описывает изменение комплексов токов и напряжений с изменением расстояния x от начала кабеля и может быть решена с учетом гранич-

ных условий. Примем в качестве известных граничных условий комплексы напряжений \dot{U}_{11} и \dot{U}_{21} в начале кабеля и комплексы полных сопротивлений нагрузки \underline{Z}_{H1} и \underline{Z}_{H2} , и введем такие обозначения:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \sqrt{(\underline{Z}_0 + \underline{Z}_M) \cdot (\underline{Y}_S - \underline{Y}_{12})}, \\ \gamma_2 &= \sqrt{(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M) \cdot (\underline{Y}_S + \underline{Y}_{12})}, \\ \underline{Z}_{B1} &= \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_M}{\underline{Y}_S - \underline{Y}_{12}}}, \\ \underline{Z}_{B2} &= \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{\underline{Y}_S + \underline{Y}_{12}}}. \end{aligned}$$

В этих выражениях γ_1 и γ_2 имеют смысл коэффициентов распространения, а \underline{Z}_{B1} и \underline{Z}_{B2} – волновых сопротивлений.

Тогда, принимая длину линии равной l и решая (2) относительно комплексов напряжений $\dot{U}_1(x)$ и $\dot{U}_2(x)$ в любой точке линии, получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1(x) &= \frac{1}{2} \left[(\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}) \frac{sh\gamma_1(l-x) + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B1}} ch\gamma_1(l-x)}{sh\gamma_1 l + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B1}} ch\gamma_1 l} + \right. \\ &\quad \left. + (\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}) \frac{sh\gamma_2(l-x) + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B2}} ch\gamma_2(l-x)}{sh\gamma_2 l + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B2}} ch\gamma_2 l} \right] \\ \dot{U}_2(x) &= \frac{1}{2} \left[(\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}) \frac{sh\gamma_1(l-x) + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B1}} ch\gamma_1(l-x)}{sh\gamma_1 l + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B1}} ch\gamma_1 l} - \right. \\ &\quad \left. - (\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}) \frac{sh\gamma_2(l-x) + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B2}} ch\gamma_2(l-x)}{sh\gamma_2 l + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B2}} ch\gamma_2 l} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Формулы (3) и являются математической моделью, учитывающей взаимное влияние между двумя проводниками кабеля.

3. Результаты моделирования

На основании разработанной математической модели выполнено исследование влияния взаимных связей между двумя проводниками реального кабеля марки ААГ 3×25-6 длиной 100 км с такими значениями первичных параметров [1]: $R_1 = R_2 = 1,66 \Omega/km,$
 $L_1 = L_2 = 3,95 \cdot 10^{-4} H/km, \quad M = 2,9 \cdot 10^{-4} H/km,$
 $C_{10} = C_{20} = 0,182 \cdot 10^{-6} F/km, \quad C_{12} = 0,28 \cdot 10^{-6} F/km,$
 $G_{12} = G_{10} = G_{20} = 0.$ Первый проводник подключен к фазе А, а второй – к фазе С трехфазной симметричной системы с фазным напряжением 220 В. По формулам (3) выполнялись расчеты действующих значений и начальных фаз напряжений первого и второго про-

водников на различных расстояниях от начала кабеля. На основании этих данных делались выводы относительно степени несимметрии системы напряжений в соответствующих точках кабеля. Степень несимметрии по напряжению определялась как разность напряжений проводников фазы А и фазы С (в симметричной системе напряжения должны быть одинаковыми). Степень несимметрии по фазе определялась как отклонение разности начальных фаз напряжений фазы С и фазы А от 120° (в симметричной системе разность соответствующих фаз должна быть равна 120°). Моделирование выполнялось для частот основной гармоники (50 Hz) и 50-й гармоники (2500 Hz). Результаты моделирования степени несимметрии по напряжению приведены на рис. 2, а степени несимметрии по фазе – на рис. 3.

Как видно из рис. 2, на частоте первой гармоники степень асимметрии монотонно увеличивается при увеличении расстояния от начала кабеля, достигая в его конце уровня примерно 5 вольт, что составляет около 2,3 % от рабочего напряжения 220 В.

Однако на 50-й гармонике степень несимметрии резко возрастает, достигая 50 В (23 %) в конце кабеля. При этом на кривой наблюдается четко выраженный максимум 67 В на расстоянии около 20 км от начала кабеля.

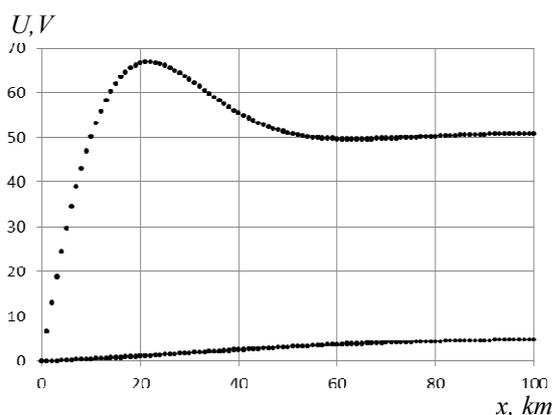


Рис. 2. Степень несимметрии по напряжению

Несимметрия по фазе в конце кабеля достигает 4 градусов для первой и пятидесятой гармоник.

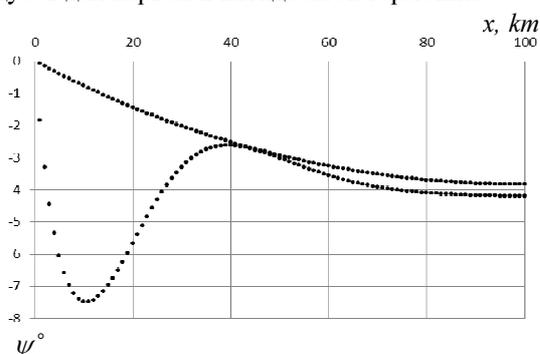


Рис. 3. Степень несимметрии по фазе

Однако, как видно из рис. 3, на расстоянии около 5 километров от начала линии фазовый сдвиг между напряжениями проводников кабеля довольно значительно отличается от 120° и составляет 112° .

В случае отсутствия взаимных влияний система напряжений остается полностью симметричной на всей длине кабеля.

Выводы

Проведенные в настоящей работе исследования показывают значительную степень влияния взаимных гальванических и магнитных связей между проводниками кабеля на симметрию трехфазной системы напряжения, передаваемого по этому кабелю. Так, из рис. 2 и рис.3 видно, что при питании симметричной нагрузки от симметричного источника посредством такого кабеля трехфазная система в целом теряет симметрию. Таким образом, при расчетах трехфазных систем электроснабжения с использованием бронированных кабелей учет взаимных связей между проводниками кабеля является необходимым.

Список использованной литературы

1. Карпушенко В. П. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість / [В. П. Карпушенко, Л. А. Щебенюк, Ю. О. Антоненко, О. А. Науменко]. – Харьков : Регіон-інформ, 2000. – 376 с.
2. Балашов А. И. Кабели и провода. Основы кабельной техники / А. И. Балашов, М. А. Боев, А. С. Воронцов [и др.] ; под ред. И. Б. Пешкова. – М. : Энергоатомиздат, 2009. – 470 с.
3. Большанин Г. А. Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной линии электропередачи / Г. А. Большанин, Л. Ю. Большанина // Системы. Методы. Технологии. – № 1(3) . – Братск : [БрГУ], 2010. – С. 58 – 63.
4. Mazzanti G., and Marzinotto M., (2013), Fundamentals of HVDC Cable Transmission, NY: Wiley-IEEE Press, 384 p.
5. Karady G., and Holbert K., (2013), Transmission Lines and Cables, NY: Wiley-IEEE Press, 854 p.
6. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В Жежеленко, Ю. Л. Саенко: 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

Получено 15.05.2015

References

1. Karpushenko V.P., Shhebenjuk L.A., Antonec' Ju. O., and Naumenko O.A.. Silovi kabeli niz'koї ta seredn'oi napруги. Konstrujuvannja, tehnologija, jakist' [Power Cables Low and Medium Voltage. Design, Technology, Quality], (2000), Harkiv, Ukraine, *Region- Inform*, 376 p. (In Ukrainian).
2. Balashov A.I., Boev M.A., and Vorontsov A. Kabeli i provoda. Osnovy kabel'noj tehnik [Cables and Wires. Fundamentals of Cable Technology], (2009),

Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 470 p. (In Russian).

3. Bol'shanin G.A., and Bol'shanina L.Ju. Osobnosti rasprostraneniya jelektricheskoy jenergii po trehpроводной линии jelektroperedachi [Features of Distribution of Electrical Energy for a three-wire Power Line], (2010), *Sistemy. Metody. Tehnologii*, No. 1(3), Bratsk, Russian Federation, [*BrGU*], pp. 58 – 63 (In Russian).

4. Mazzanti G., and Marzinotto M., (2013), Fundamentals of HVDC Cable Transmission, *NY: Wiley-IEEE Press*, 384 p.

5. Karady G., and Holbert K., (2013), Transmission Lines and Cables, *NY: Wiley-IEEE Press*, 854 p.

6. Zhezhelenko I.V. Pokazateli kachestva jelektrojenergii i ih kontrol' na promyshlennyh predpriyatijah [Power Quality and Control of Industrial Plants]. (2000), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 252 p. (In Russian).



Маевский
Дмитрий Андреевич, д-р
техн. наук, проф., зав. каф.
теоретических основ и об-
щей электротехники Одес-
ского политехнического ун-
та, пр-т Шевченко, 1,
тел. (048) 705-84-54.
E-mail: ifs@ukr.net



Семенюг
Александр Николаевич,
зам. генерального директора
ООО «С-мануфактуринг».
Одесса, ул. Н. Боровского,
28, корп. 47,
тел. (048) 730-57-31.
E-mail:
aleksander.semenyug@s-m.ua



Кучеренко
Галина Николаевна,
студентка магистратуры
Одесского политехнического
ун-та, тел. (048) 705-84-54.
E-mail: galina9411@mail.ru