

УДК 621.31

**Маевский Д. А.**, д-р техн. наук,  
**Маевская Е. Ю.**, канд. техн. наук,  
**Семенюг А. Н.**,  
**Огинская С. Н.**

### **ОСОБЕННОСТИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО КАБЕЛЯ С УЧЕТОМ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ЕГО ПРОВОДНИКАМИ**

***Аннотация.** В статье, на основании разработанной математической модели, проведено моделирование работы трехфазного силового кабеля с учетом связей между его проводниками. Проведенные на основании этой модели расчеты показывают, что при протяженности кабельных силовых линий в несколько километров, взаимные влияния между проводниками приводят к снижению качества электрической энергии в случае несимметричных режимов работы трехфазной сети.*

***Ключевые слова:** электрический кабель, качество электрической энергии, электромагнитная совместимость, взаимные влияния, линии электропередачи*

**Маєвський Д. А.**, д-р техн. наук,  
**Маєвська О. Ю.**, канд. техн. наук,  
**Семенюг А.М.**,  
**Огинська С. М.**

### **ОСОБЛИВОСТІ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРИФАЗНОГО КАБЕЛЮ З УРАХУВАННЯМ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ЙОГО ПРОВІДНИКАМИ**

***Анотація.** У статті, на підставі розробленої математичної моделі, проведено моделювання роботи трифазного силового кабелю з урахуванням зв'язків між його провідниками. Проведені на підставі цієї моделі розрахунки показують, що при протяжності кабельних силових ліній в декілька кілометрів, взаємні впливи між провідниками призводять до зниження якості електричної енергії у випадку несиметричних режимів роботи трифазної мережі.*

***Ключові слова:** електричний кабель, якість електричної енергії, електромагнітна сумісність, взаємні впливи, лінії електропередачі*

**Maevsky D.**, ScD.,  
**Maevskaya E.** PhD.,  
**Semenyug A.**,  
**Oginskayja S.**

### **FEATURES OF ASYMMETRIC MODES THREE-PHASE CABLE WORKS TAKING INTO ACCOUNT THE RELATIONS BETWEEN ITS WIRES**

***Abstract:** In the article, on the basis of the developed mathematical model, simulations of the working modes of three-phase power cable has been made. Model is developed for account the links between its conductors. Calculations, carried on the basis of this model is shown that in the case of cable length of several kilometers, the mutual influence between the conductors lead to reduced quality of electric energy in case of asymmetric modes of operation of the three-phase network.*

***Keywords:** electric cable, quality of electric energy, electromagnetic compatibility, mutual influence, transmission line.*

#### **1. Введение**

Высокое качество электрической энергии и обеспечение электромагнитной совместимости является основной задачей современной электроэнергетики. Сегодня во всех сферах промышленности, энергетики и

транспорта используются электронные устройства. Эти устройства выполняют функции контроля и управления, что приводят к необходимости минимизации вредных воздействий. При этом следует учитывать влияние питающей сети на устройства, взаимные влияния между компонентами

устройств и влияние этих устройств на электрическую сеть. При анализе электромагнитной совместимости необходимо изучить воздействие электромагнитных помех, которые излучаются устройствами. Но кроме этих помех, существуют также помехи, распространяющихся по проводникам силовых питающих кабелей. Именно силовые кабельные линии являются наиболее распространенными в системах электроснабжения крупных населенных пунктов.

Преимуществами кабельных линий перед воздушными являются:

- отсутствие необходимости отведения зоны отчуждения для высоковольтных линий в условиях плотной застройки на территории населенных пунктов;
- отсутствие необходимости сноса жилых построек в охранной зоне;
- высокая надежность кабельных линий – на них не влияют погодные факторы, намного реже происходят механические повреждения;
- кабельные линии позволяют существенно снизить потери мощности при передаче электроэнергии (согласно [1], на 30% меньше, чем в воздушных линиях).

Согласно [2], общая протяженность кабельных сетей в современных мегаполисах может достигать нескольких сотен километров. При такой длине кабельную линию необходимо рассматривать как линию с распределенными параметрами, в которых, как известно, действующие токи и напряжения могут подвергаться существенным искажениям [3]. Применительно к силовым кабелям можно говорить об искажении симметрии трехфазной системы напряжений, подаваемой к началу кабеля. Предварительные расчеты, проведенные для кабеля с двумя проводниками, показали наличие существенных искажений симметричности системы как по амплитуде, так и по фазе [4, 5]. Таким образом, анализ влияния трехфазного кабеля на качество электрической энергии является актуальной задачей. Для ее выполнения следует создать математическую модель распространения токов и напряжений в кабеле. На основании этой модели необходимо выполнить расчеты для разных режимов работы кабеля.

## **2. Математическая модель распространения токов и напряжений в кабеле**

При расчете токов и напряжений в кабеле с учетом магнитных и гальванических связей между его проводниками, кабель следует рассматривать как линию с распределенными параметрами. В этом случае все токи и напряжения будут функциями двух переменных – времени и расстояния. Традиционно принято осуществлять отсчет расстояний от начала кабеля. В качестве начала примем тот конец кабеля, к которому подключен источник трехфазного напряжения.

Существующие гальванические и емкостные связи между проводниками кабеля моделируются проводимостями  $G$  и конденсаторами  $C$ . Причиной гальванических связей является неидеальность изоляции кабеля. Не смотря на совершенство используемых материалов, любой реальный диэлектрик имеет очень малую проводимость. Здесь и в дальнейшем под проводимостью  $G$  понимается удельная проводимость единицы длины кабеля, которая измеряется в  $S/m$ . Удельная проводимость в теоретической электротехнике обычно обозначается как  $G_0$ . Для того, чтобы упростить индексацию, индекс “0” будем опускать.

Наличие емкостной связи понятно – это неизбежно присутствующая емкость между проводниками кабеля, а также между каждым из проводников и экраном. Как и в случае проводимостей, здесь и в дальнейшем понимается удельная емкость единицы длины проводника, измеряемая в  $F/m$ . Кроме гальванической и емкостной связи, проводники кабеля имеют между собой магнитную связь с коэффициентами взаимной индукции  $M_{12}$ ,  $M_{13}$  и  $M_{23}$ . Каждый из проводников характеризуется собственными удельными параметрами – индуктивностью  $L$  и активным сопротивлением  $R$ . Здесь также подразумеваются удельные (на единицу длины) индуктивности и сопротивления.

Проведенный анализ позволяет составить схему замещения участка трехфазного силового кабеля. Применяя первый и второй законы Кирхгофа, на основании этой схемы замещения можно получить математическую модель распространения токов и

напряжений в кабеле. С учетом того, что все токи и напряжения являются функцией двух переменных, математическая модель должна быть представлена в виде системы дифференциальных уравнения в частных производных. Процесс составления схемы замещения и получения математической модели подробно изложен в [6]. Согласно [6], математическая модель распространения токов и напряжений в кабеле имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{\partial u_1}{\partial x} &= R_1 i_1 + L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M_{12} \frac{\partial i_2}{\partial t} + M_{13} \frac{\partial i_3}{\partial t} \\ -\frac{\partial u_2}{\partial x} &= R_2 i_2 + L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + M_{12} \frac{\partial i_1}{\partial t} + M_{23} \frac{\partial i_3}{\partial t} \\ -\frac{\partial u_3}{\partial x} &= R_3 i_3 + L_3 \frac{\partial i_3}{\partial t} + M_{13} \frac{\partial i_1}{\partial t} + M_{23} \frac{\partial i_2}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_1}{\partial x} &= G_{11} \cdot u_1 - G_{12} \cdot u_2 - G_{13} \cdot u_3 + C_{11} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial t} - \\ &\quad - C_{12} \cdot \frac{\partial u_2}{\partial t} - C_{13} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_2}{\partial x} &= -G_{12} \cdot u_1 + G_{22} \cdot u_2 - G_{23} \cdot u_3 - C_{12} \frac{\partial u_1}{\partial t} + \\ &\quad + C_{22} \cdot \frac{\partial u_2}{\partial t} - C_{23} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_3}{\partial x} &= -G_{13} \cdot u_1 - G_{23} \cdot u_2 + G_{33} \cdot u_3 - C_{13} \frac{\partial u_1}{\partial t} - \\ &\quad - C_{23} \frac{\partial u_2}{\partial t} + C_{33} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial t} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Эта система уравнений является математической моделью зависимости токов и напряжений в проводниках кабеля от временной и пространственной координат.

Аналитическое решение системы (1) в общем случае невозможно. Однако предположив, что в проводниках кабеля действуют переменные синусоидальные напряжения после преобразований получаем:

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{d\dot{U}_1}{dx} &= \underline{Z}_{11} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{12} \dot{I}_2 + \underline{Z}_{13} \dot{I}_3 \\ -\frac{d\dot{U}_2}{dx} &= \underline{Z}_{12} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{22} \dot{I}_2 + \underline{Z}_{23} \dot{I}_3 \\ -\frac{d\dot{U}_3}{dx} &= \underline{Z}_{13} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{23} \dot{I}_2 + \underline{Z}_{33} \dot{I}_3 \\ -\frac{d\dot{I}_1}{dx} &= \underline{Y}_{11} \cdot \dot{U}_1 - \underline{Y}_{12} \cdot \dot{U}_2 - \underline{Y}_{13} \cdot \dot{U}_3 \\ -\frac{d\dot{I}_2}{dx} &= -\underline{Y}_{12} \cdot \dot{U}_1 + \underline{Y}_{22} \cdot \dot{U}_2 - \underline{Y}_{23} \cdot \dot{U}_3 \\ -\frac{d\dot{I}_3}{dx} &= -\underline{Y}_{13} \cdot \dot{U}_1 - \underline{Y}_{23} \cdot \dot{U}_2 + \underline{Y}_{33} \cdot \dot{U}_3 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Система (2) является математической моделью процесса распространения токов и

напряжений в проводниках трехфазного кабеля в установившемся синусоидальном режиме. В этой системе введены следующие обозначения:  $\underline{Z}_{11} = R_1 + j\omega L_1$ ,  $\underline{Z}_{22} = R_2 + j\omega L_2$ ,  $\underline{Z}_{33} = R_3 + j\omega L_3$ ,  $\underline{Z}_{12} = j\omega M_{12}$ ,  $\underline{Z}_{13} = j\omega M_{13}$ ,  $\underline{Z}_{23} = j\omega M_{23}$ ,  $\underline{Y}_{11} = G_{11} + j\omega C_{11}$ ,  $\underline{Y}_{22} = G_{22} + j\omega C_{22}$ ,  $\underline{Y}_{33} = G_{33} + j\omega C_{33}$ ,  $\underline{Y}_{12} = G_{12} + j\omega C_{12}$ ,  $\underline{Y}_{13} = G_{13} + j\omega C_{13}$ ,  $\underline{Y}_{23} = G_{23} + j\omega C_{23}$ .

Аналитическое решение этой системы получено для условия полной симметрии проводников кабеля. В этом случае все первичные параметры проводников одинаковы. Решение системы (2), полученное с помощью компьютерной программы Wolfram-Alpha, имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{U}_1(x) &= \frac{1}{3} [(C_1 + C_3 + C_5) \cdot ch\gamma_1 x + (2C_1 - C_3 - C_5) \cdot ch\gamma_2 x + \\ &\quad + (C_2 + C_4 + C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_1} sh\gamma_1 x + (2C_2 - C_4 - C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_2} sh\gamma_2 x] \\ \dot{U}_2(x) &= \frac{1}{3} [(C_1 + C_3 + C_5) \cdot ch\gamma_1 x + (2C_3 - C_1 - C_5) \cdot ch\gamma_2 x + \\ &\quad + (C_2 + C_4 + C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_1} sh\gamma_1 x + (2C_4 - C_2 - C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_2} sh\gamma_2 x] \\ \dot{U}_3(x) &= \frac{1}{3} [(C_1 + C_3 + C_5) \cdot ch\gamma_1 x + (2C_5 - C_1 - C_3) \cdot ch\gamma_2 x + \\ &\quad + (C_2 + C_4 + C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_1} sh\gamma_1 x + (2C_6 - C_2 - C_4) \cdot \frac{1}{\gamma_2} sh\gamma_2 x] \\ \dot{I}_1(x) &= \frac{1}{3} \left[ -\frac{(C_1 + C_3 + C_5)}{\underline{Z}_{B1}} \cdot sh\gamma_1 x - \frac{(C_2 + C_4 + C_6)}{\gamma_1 \cdot \underline{Z}_{B1}} \cdot ch\gamma_1 x - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(2C_1 - C_3 - C_5)}{\underline{Z}_{B2}} \cdot sh\gamma_2 x - \frac{(2C_2 - C_4 - C_6)}{\gamma_2 \cdot \underline{Z}_{B2}} \cdot ch\gamma_2 x \right] \\ \dot{I}_2(x) &= \frac{1}{3} \left[ -\frac{C_1 + C_3 + C_5}{\underline{Z}_{B1}} \cdot sh\gamma_1 x - \frac{C_2 + C_4 + C_6}{\gamma_1 \underline{Z}_{B1}} \cdot ch\gamma_1 x - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2C_3 - C_1 - C_5}{\underline{Z}_{B2}} \cdot sh\gamma_2 x - \frac{2C_4 - C_2 - C_6}{\gamma_2 \underline{Z}_{B2}} \cdot ch\gamma_2 x \right] \\ \dot{I}_3(x) &= \frac{1}{3} \left[ -\frac{C_1 + C_3 + C_5}{\underline{Z}_{B1}} \cdot sh\gamma_1 x - \frac{C_2 + C_4 + C_6}{\gamma_1 \underline{Z}_{B1}} \cdot ch\gamma_1 x - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2C_5 - C_1 - C_3}{\underline{Z}_{B2}} \cdot sh\gamma_2 x - \frac{2C_6 - C_2 - C_4}{\gamma_2 \underline{Z}_{B2}} \cdot ch\gamma_2 x \right] \end{aligned} \right. \quad (3)$$

В системе (3) коэффициенты распространения  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  находятся по формулам:

$$\gamma_1 = \sqrt{(\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1)(\underline{Y}_0 - 2\underline{Y}_1)},$$

$$\gamma_2 = \sqrt{(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1)(\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1)}.$$

Волновые сопротивления  $\underline{Z}_{B1}$  и  $\underline{Z}_{B2}$  находятся как:

$$\underline{Z}_{B1} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1}{\underline{Y}_0 - 2\underline{Y}_1}},$$

$$Z_{B2} = \sqrt{\frac{Z_0 - Z_1}{Y_0 + Y_1}}$$

Постоянные интегрирования  $C_1 - C_6$  могут быть найдены из начальных условий. В нашем случае по условию известны напряжения в начале первого, второго и третьего проводников кабеля ( $\dot{U}_{11}$ ,  $\dot{U}_{21}$  и  $\dot{U}_{31}$  соответственно). Известными считаются также сопротивления нагрузки, подключенные в конце этих проводников –  $Z_{H1}$ ,  $Z_{H2}$  и  $Z_{H3}$ . Постоянные интегрирования с нечетными номерами можно найти как:

$$\begin{aligned} C_1 &= \dot{U}_{11}, \\ C_3 &= \dot{U}_{21}, \\ C_5 &= \dot{U}_{31}. \end{aligned}$$

Вторая группа постоянных интегрирования –  $C_2$ ,  $C_4$  и  $C_6$  находится по формулам:

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{(A_4A_6 - A_3A_5)F_1 + (A_1A_5 - A_1A_6)F_2 + (A_1A_3 - A_1A_4)F_3}{2A_1A_3A_5 - A_2A_3A_5 - A_1A_4A_5 - A_1A_3A_6 + A_2A_4A_6}, \\ C_4 &= \frac{(A_3A_5 - A_3A_6)F_1 + (A_2A_6 - A_1A_5)F_2 + (A_1A_3 - A_2A_3)F_3}{2A_1A_3A_5 - A_2A_3A_5 - A_1A_4A_5 - A_1A_3A_6 + A_2A_4A_6}, \\ C_6 &= \frac{(A_3A_5 - A_4A_5)F_1 + (A_1A_5 - A_2A_5)F_2 + (A_2A_4 - A_1A_3)F_3}{2A_1A_3A_5 - A_2A_3A_5 - A_1A_4A_5 - A_1A_3A_6 + A_2A_4A_6}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} - \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{H1} ch\gamma_1 l}{Z_{B1} \gamma_1} - \frac{Z_{H1} ch\gamma_2 l}{Z_{B2} \gamma_2}, \\ A_2 &= \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} + 2 \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{H1} ch\gamma_1 l}{Z_{B1} \gamma_1} + 2 \frac{Z_{H1} ch\gamma_2 l}{Z_{B2} \gamma_2}, \\ A_3 &= \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} - \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{H2} ch\gamma_1 l}{Z_{B1} \gamma_1} - \frac{Z_{H2} ch\gamma_2 l}{Z_{B2} \gamma_2}, \\ A_4 &= \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} + 2 \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{H2} ch\gamma_1 l}{Z_{B1} \gamma_1} + 2 \frac{Z_{H2} ch\gamma_2 l}{Z_{B2} \gamma_2}, \\ A_5 &= \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} - \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{H3} ch\gamma_1 l}{Z_{B1} \gamma_1} - \frac{Z_{H3} ch\gamma_2 l}{Z_{B2} \gamma_2}, \\ A_6 &= \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} + 2 \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{H3} ch\gamma_1 l}{Z_{B1} \gamma_1} + 2 \frac{Z_{H3} ch\gamma_2 l}{Z_{B2} \gamma_2}. \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} F_1 &= -(\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21} + \dot{U}_{31}) \cdot ch\gamma_1 l - (2\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21} - \dot{U}_{31}) \cdot ch\gamma_2 l - \\ & - (\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21} + \dot{U}_{31}) \cdot \frac{Z_{H1} sh\gamma_1 l}{Z_{B1}} - (2\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21} - \dot{U}_{31}) \cdot \frac{Z_{H1} sh\gamma_2 l}{Z_{B2}}, \\ F_2 &= -(\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21} + \dot{U}_{31}) \cdot ch\gamma_1 l - (2\dot{U}_{21} - \dot{U}_{11} - \dot{U}_{31}) \cdot ch\gamma_2 l - \\ & - (\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21} + \dot{U}_{31}) \cdot \frac{Z_{H2} sh\gamma_1 l}{Z_{B1}} - (2\dot{U}_{21} - \dot{U}_{11} - \dot{U}_{31}) \cdot \frac{Z_{H2} sh\gamma_2 l}{Z_{B2}}, \\ F_3 &= -(\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21} + \dot{U}_{31}) \cdot ch\gamma_1 l - (2\dot{U}_{31} - \dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}) \cdot ch\gamma_2 l - \\ & - (\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21} + \dot{U}_{31}) \cdot \frac{Z_{H3} sh\gamma_1 l}{Z_{B1}} - (2\dot{U}_{31} - \dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}) \cdot \frac{Z_{H3} sh\gamma_2 l}{Z_{B2}}. \end{aligned}$$

Для исследования влияния связей между проводниками кабеля на качество электриче-

ской энергии, по приведенным выше уравнением с помощью компьютерной программы была проведена серия расчетов. Расчеты выполнялись для разных режимов работы трехфазной сети, в состав которой входит кабель.

### 3. Результаты исследований

В соответствии с разработанной математической моделью выполнены расчеты распределения напряжений по длине проводников трехфазного кабеля среднего напряжения марки N2XSEY 3×50/16 фирмы Siemens. Первичные параметры кабеля согласно [7]:  $R_1 = R_2 = R_3 = 0,494 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1 = L_2 = L_3 = 0,359 \text{ мН}/\text{km}$ ,  $C_{11} = C_{22} = C_{33} = 0,182 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $M_{12} = M_{13} = M_{23} = 0,29 \text{ мН}/\text{km}$ ,  $C_{12} = C_{13} = C_{23} = 0,28 \mu\text{F}/\text{km}$ . Изоляция кабеля принята идеальной, то есть  $G_{12} = G_{13} = G_{23} = G_{11} = G_{22} = G_{33} = 0$ . Внешний вид и поперечное сечение кабеля представлены на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид и поперечное сечение кабеля N2XSEY 3×50/16

Токоведущей частью кабеля является медный проводник, состоящий из 16 отдельных медных проволок. Этот кабель широко используется для прокладки внутри помещений, на открытом воздухе, в земле, в том числе, в условиях повышенной влажности в кабельных каналах. Кабель предназначен для присоединения устройств электрического питания и распределения в сетях промышленного назначения.

Для выполнения расчетов составлена компьютерная программа в среде Microsoft Excel на языке VBA. Расчеты выполнялись в предположении, что к началу кабеля подключен симметричный трехфазный источник напряжением 10 kV. Сопротивление нагрузки, подключенной к концу кабеля может меняться как по величине, так и по характеру (индуктивное или емкостное).

В качестве основных показателей качества электрической энергии выбраны несимметрия по амплитуде и несимметрия по фазе. Несимметрия по амплитуде вычисляется как абсолютное значение разности напряжений отдельных фаз на выходе кабеля. В идеальном случае эта разность равна нулю. Несимметрия по фазе вычисляется как отклонение сдвига по фазе напряжений отдельных жил кабеля от 120 градусов. В идеальном случае несимметрия по фазе равняется нулю.

В результате расчетов выяснено, что в случае симметричной нагрузки магнитные и гальванические связи между проводниками кабеля не влияют на оба выбранных показателя. Это объясняется тем, что, например, при разности фаз напряжений проводника А и проводника В кабеля, их влияние на проводник фазы С взаимно уравнивается. Поэтому основное внимание при выполнении исследований было сосредоточено на аварийных режимах работы трехфазной системы, возникающих при обрыве одной из фаз. В этом случае влияние одного из проводников кабеля исчезает и начинает проявляться влияние магнитных и гальванических связей.

На рис. 2 представлена зависимость несимметрии по амплитуде, возникающая в проводниках фаз А и В при обрыве фазы С.

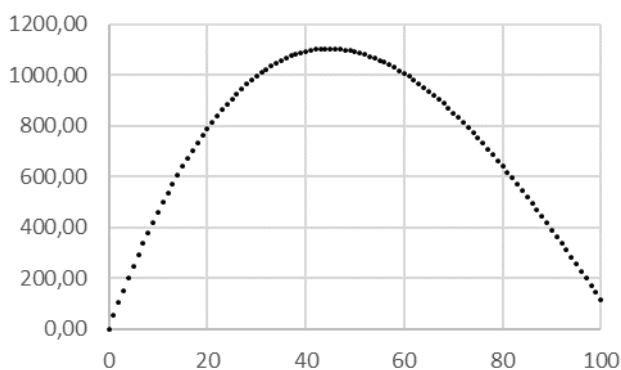


Рис. 2. Зависимость несимметрии по амплитуде от длины кабеля

Здесь по оси абсцисс приведено расстояние от начала кабеля (в километрах), а по оси ординат – степень несимметрии по амплитуде (в вольтах). Как видим, в середине кабеля при симметричном источнике,

несимметрия по амплитуде составляет более 1100 вольт (около 11% от величины входного напряжения).

На рис. 3 представлена зависимость несимметрии по фазе для того же кабеля.

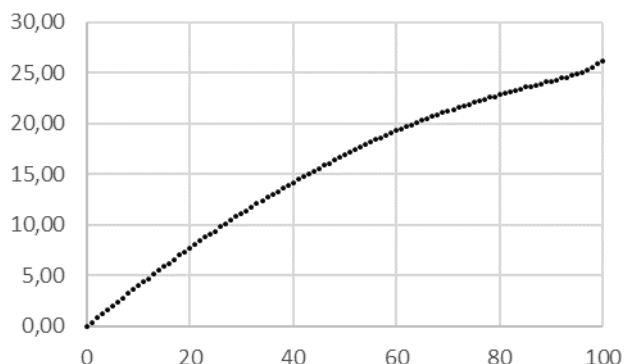


Рис. 3. Зависимость несимметрии по фазе от длины кабеля

Из этого рисунка видно, что с увеличением длины кабеля степень несимметрии по фазе увеличивается и может достигать 25 – 30 градусов, то есть более 25%.

### Выводы

Представленные в статье результаты свидетельствуют о том, что качество электрической энергии на выходе трехфазного кабеля может существенно ухудшаться по сравнению с качеством энергии на его входе. Ухудшение качества связано с наличием магнитных и гальванических связей между проводниками кабеля. Влияние этих связей начинает проявляться при сравнительно небольшой длине кабельной линии – 10 – 15 километров. В крупных городах протяженность кабельных линий сегодня составляет более 50 километров. При такой длине кабельной линии, как показано в статье, происходит значительное ухудшение качества энергии, оставляемой от источника к нагрузке.

При традиционном проектировании кабельных линий электропередачи эффекты, обусловленные взаимными влияниями, не учитываются. Однако, как показали расчеты, при длине линии в несколько десятков километров пренебрегать этими эффектами нельзя. Взаимные индуктивные и гальванические связи между проводниками кабеля приводят к тому, что даже при наличии

симметричного трехфазного источника, подключенного в начале кабеля, в нагрузку поступает несимметричное электрическое питание. Эти эффекты наблюдаются только в аварийных режимах и в случае несимметрии нагрузки.

В настоящей статье исследованы только случаи возникновения аварийных режимов – обрыв одной из фаз. Поэтому направлениями дальнейших исследований могут стать:

- исследование работы кабельной линии при коротком замыкании одной из фаз;
- исследование влияния несимметрии нагрузки на качество электрической энергии;
- экспериментальные исследования выявленных эффектов в реальных кабельных линиях электропередачи.

Однако, проведение экспериментальных исследований связано с довольно существенными трудностями. Для их выполнения нужно располагать трехфазным кабелем очень большой длины – несколько десятков километров. С учетом того, что стоимость по каталогу кабеля N2XSEY 3×50/16 составляет около 50 евро за 1 метр, то приобретение такого кабеля для экспериментальных исследований становится практически невозможным. Решением этой проблемы является выполнение исследований на кабелях значительно меньшей длины, в несколько метров, но на частотах, значительно превышающих промышленную частоту 50 Hz. Полученные таким образом экспериментальные данные необходимо сравнивать с расчетами, выполненными по приведенной математической модели для той же длины и частоты. Эта методика открывает также путь исследования переходных процессов в силовых трехфазных кабелях при наличии индуктивной и гальванической связи между проводниками.

#### Список использованных источников

1. Wong, K. Prioritization of underground transmission cable renewal projects in power electric utility companies / K. Wong // *IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. – Toronto, 2014. – P. 1–5.
2. Zuochun, Z. Fault reason analysis of 10kV cable lines of city power grid with OWTS state

detection / Zhou Zuochun, Zhang Yanyan, Li Huachun // *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. – Shanghai, 2012. – P. 1–8.

3. Ibbotson, L. *The Fundamentals of Signal Transmission Inline, waveguide, fiber and free Space*. – Burlington: Elsevier, 1999. –150 p.

4. Маевский, Д. А. Установившиеся режимы в связанных двухпроводных линиях передачи / Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, Г. Н. Кучеренко // *Электротехнические и компьютерные системы*. – № 14 (90). – К.: Техніка, 2014. – С. 61 – 66.

5. Маевский, Д. А. Влияние взаимных связей между проводниками кабеля на режим работы электрических сетей / Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, Г. Н. Кучеренко // *Электротехнические и компьютерные системы*. – № 19 (95). – К.: Техніка, 2015. – С. 142 – 145.

6. Семенюг, А. Н. Схема замещения трехфазного электрического кабеля с учетом взаимных влияний между проводниками / А. Н. Семенюг // *Электротехнические и компьютерные системы*. – № 21 (97). – К.: Техніка, 2016. – С. 43 – 48.

7. RoHS Compliant Cables & Wires. Electronic Resource. Access mode: [https://www.hitechcontrols.com/cables/medium\\_voltage\\_power/30-kv-power/n2xsey-3x.html](https://www.hitechcontrols.com/cables/medium_voltage_power/30-kv-power/n2xsey-3x.html).

Получено 05.05.2016

#### References

1. Wong K. Prioritization of underground transmission cable renewal projects in power electric utility companies, (2014), *IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Toronto, p.p. 1–5 (In English).
2. Zhou Zuochun, Zhang Yanyan, Li Huachun. Fault reason analysis of 10kV cable lines of city power grid with OWTS state detection, (2012), *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shanghai, p.p. 1–8 (In English).
3. Ibbotson, L. *The Fundamentals of Signal Transmission Inline, waveguide, fiber and free Space*, (1999), Burlington Elsevier, 150 p.
4. Maevsky D.A., Semenyug A.N., Kucherenko G.N. Ustanovivshiesya rezhimy v svyazannyh

dvuh-provodnyh liniyah peredachi [The steady-state modes in the coupled two-wire transmission lines], (2014), *Electrotechnic and computer system, Tehnika publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 14(90), p.p. 61–66 (In Russian).

5. D. Maevsky D.A., Semenyug A.N., Kucherenko G.N. Vliyanie vzaimnyh svyazey mezhdru provodnikami kabelya na rezhim raboty ehlektricheskikh setej [Influence of coupling between the cables conductors on the operation mode of electric networks], (2015), *Electrotechnic and computer system, Tehnika publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 19(95), p.p. 142–145 (In Russian).

6. Semenyug A.N. Skhema zameshcheniya trekhfaznogo ehlektricheskogo kabelya s uchedom vzaimnyh vliyaniy mezhdru provodnikami [Equivalent circuit of 3-phase electric cable with mutual influences between conductors], (2016), *Electrotechnic and computer system, Tehnika publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 21(97), p.p. 61–66 (In Russian).

7. RoHS Compliant Cables & Wires. Electronic Resource. Access mode: [https://www.hitechcontrols.com/cables/medium\\_voltage\\_power/30-kv-power/n2xsey-3x.html](https://www.hitechcontrols.com/cables/medium_voltage_power/30-kv-power/n2xsey-3x.html).



Маевский  
Дмитрий Андреевич,  
д.т.н., проф., заведующий  
кафедрой ТООЭ ОНПУ  
Тел. (048) 705-84-54  
dmitry.a.maevsky@gmail.com



Маевская  
Елена Юрьевна,  
к.т.н., доцент кафедры  
ТООЭ ОНПУ  
e.j.maevskaya@gmail.com



Семенюг  
Александр Николаевич,  
зам. генерального  
директора по науке  
ООО «С-инжиниринг»  
тел. (048) 730-57-31  
Aleksander.semenyug@se.ua



Огинская Светлана Николаевна, ст. пр. каф.  
ТООЭ ОНПУ,  
Тел. (048) 705-80-25