

УДК 621.311.004.12

## Прогнозирование напряжений и токов холостого хода на однородном участке трехпроводной ЛЭП, входящей в состав симметричной ЭЭС

Г.А. Большанин<sup>а</sup>, Л.Ю. Большанина<sup>б</sup>, Е.Г. Марьясова<sup>с</sup>

Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>а</sup>bolshaning@mail.ru, <sup>б</sup>brstu@bk.ru, <sup>с</sup>markageo@mail.ru

Статья поступила 13.12.2013, принята 13.02.2014

*Сформулированы условия симметрии однородного участка трехфазной линии электропередачи трехпроводного исполнения. Симметрия электроэнергетической системы обеспечивает равенства величин фазных напряжений и линейных токов. Передача электрической энергии по симметричному трехпроводному участку линии электропередачи, входящему в состав симметричной электроэнергетической системы, осуществляется тремя равновеликими парами волн электромагнитного поля: тремя падающими и тремя отраженными волнами. Прогнозирование величин напряжений и токов холостого хода возможно лишь при известных численных значениях постоянных интегрирования, которые определяются на основании схемы распределения волн электромагнитного поля вдоль анализируемого однородного участка линии электропередачи. Представлены формулы для определения численных значений этих постоянных интегрирования. Представлены графические интерпретации распределения напряжения и тока холостого хода вдоль однородного участка трехфазной линии электропередачи трехпроводного исполнения, входящего в состав симметричной электроэнергетической системы.*

**Ключевые слова:** фазные напряжения, линейные токи, режим холостого хода, однородный участок, трехпроводная линия электропередачи, симметричная электроэнергетическая система, постоянные интегрирования, падающая и отраженная волна электромагнитного поля, гармоническая составляющая, постоянная распространения электромагнитных волн, волновое сопротивление.

## Forecasting the voltages and idle currents on a homogeneous section of the three-wire power line, a part of the symmetric electric energy system

G.A. Bolshanin<sup>a</sup>, L.Yu. Bolshanina<sup>b</sup>, E.G. Maryasova<sup>c</sup>

Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup>bolshaning@mail.ru, <sup>b</sup>brstu@bk.ru, <sup>c</sup>markageo@mail.ru

Received 13.12.2013, accepted 13.02.2014

*Conditions of the symmetry of a homogeneous section of three-phase three-wire power line have been defined. The symmetry of electric energy system provides equalities for the sizes of phase voltages and linear currents. Electric energy transferring on the symmetric three-wire section of a power line, a part of the symmetric electric energy system, is carried out by three equal-sized couples of waves of electromagnetic field, i.e. three incident and reflected waves. Forecasting the voltages and idle currents is possible only if numerical values of integration constants are known and defined according to the scheme of distributing the electromagnetic waves along the analyzed homogeneous section of the power line. Computational formulae for numerical values of the integration constants have been given. Graphic interpretations of distributing the voltage and idle current along a homogeneous section of three-phase three-wire power line, a part of symmetric electric energy system, have also been given in the article.*

**Keywords:** phase voltage, linear currents, an idling mode, a homogeneous section, three-wire power line, symmetric electric energy system, constant integration, incident and reflected waves of electromagnetic field, harmonic component, propagation constant, wave resistance.

**Введение.** Симметричная электроэнергетическая система (ЭЭС) представляет собой совокупность симметричных участков, то есть устройств, предназначенных для генерации, передачи, преобразования и потребления электрической энергии. Входящие в ее состав генераторы электрических станций, линии электропередачи (ЛЭП), трансформаторные подстанции,

приемники электрической энергии и сопутствующее им электротехническое оборудование представляют собой симметричные системы.

**Методика исследования.** В симметричной ЭЭС величины фазных и линейных напряжений и токов равны между собой, но отличаются друг от друга на

треть периода, т. е. сдвинуты относительно друг друга на угол  $120^0$ . При этом справедливы равенства:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{An} + \dot{I}_{Bn} + \dot{I}_{Cn} &= 0; \\ \dot{U}_{An} + \dot{U}_{Bn} + \dot{U}_{Cn} &= 0; \\ \dot{U}_{ABn} + \dot{U}_{BCn} + \dot{U}_{CAn} &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где  $\dot{I}_{An}, \dot{I}_{Bn}, \dot{I}_{Cn}$  и  $\dot{U}_{An}, \dot{U}_{Bn}, \dot{U}_{Cn}, \dot{U}_{ABn}, \dot{U}_{BCn}, \dot{U}_{CAn}$  – линейные токи и фазные и линейные напряжения на частоте  $n$ -й гармонической составляющей.

Однородный участок трехпроводной ЛЭП, входящий в состав симметричной ЭЭС, не должен нарушать ее симметрию, то есть тоже должен быть симметричным и соответствовать равенствам:

$$\left. \begin{aligned} R_{0An} &= R_{0Bn} = R_{0Cn}; \\ L_{0An} &= L_{0Bn} = L_{0Cn}; \\ G_{0ABn} &= G_{0BCn} = G_{0CAn}; \\ M_{0ABn} &= M_{0BCn} = M_{0CAn}; \\ C_{0ABn} &= C_{0BCn} = C_{0CAn}; \\ G_{0A0n} &= G_{0B0n} = G_{0C0n}; \\ C_{0A0n} &= C_{0B0n} = C_{0C0n}, \end{aligned} \right\}$$

где  $R_{0An}, R_{0Bn}, R_{0Cn}$  и  $L_{0An}, L_{0Bn}, L_{0Cn}$  – погонные активные сопротивления и собственные индуктивности линейных проводов однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте  $n$ -й гармонической составляющей;  $M_{0ABn}, M_{0BCn}$  и  $M_{0CAn}$  – погонные взаимные индуктивности между линейными проводами однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте  $n$ -й гармонической составляющей;  $G_{0ABn}, G_{0BCn}, G_{0CAn}$  и  $C_{0ABn}, C_{0BCn}, C_{0CAn}$  – погонные активные проводимости и емкости между линейными проводами на частоте  $n$ -й гармонической составляющей;  $G_{0A0n}, G_{0B0n}, G_{0C0n}$  и  $C_{0A0n}, C_{0B0n}, C_{0C0n}$  – погонные активные проводимости и емкости между линейными проводами и «землей» на частоте  $n$ -й гармонической составляющей.

Иначе эти равенства можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Y}_{0A0n} &= \underline{Y}_{0B0n} = \underline{Y}_{0C0n} = \underline{Y}_{0F0n}; \\ \underline{Y}_{0ABn} &= \underline{Y}_{0BCn} = \underline{Y}_{0CAn} = \underline{Y}_{0Ln}; \\ \underline{Z}_{0An} &= \underline{Z}_{0Bn} = \underline{Z}_{0Cn} = \underline{Z}_{0Fn}; \\ \underline{Z}_{0ABn} &= \underline{Z}_{0BCn} = \underline{Z}_{0CAn} = \underline{Z}_{0Mn}, \end{aligned} \right\}$$

где  $\underline{Y}_{0A0n}, \underline{Y}_{0B0n}, \underline{Y}_{0C0n}$  и  $\underline{Y}_{0F0n}$  – полные проводимости между линейными проводами и «землей» на частоте  $n$ -й гармонической составляющей;  $\underline{Y}_{0ABn}, \underline{Y}_{0BCn}, \underline{Y}_{0CAn}$  и  $\underline{Y}_{0Ln}$  – полные проводимости между линейными проводами на частоте  $n$ -й гармонической составляющей;  $\underline{Z}_{0An}, \underline{Z}_{0Bn}, \underline{Z}_{0Cn}$  и  $\underline{Z}_{0Fn}$  – полные сопротивления линейных проводов на частоте  $n$ -й гармонической составляющей;  $\underline{Z}_{0ABn}, \underline{Z}_{0BCn}, \underline{Z}_{0CAn}$  и  $\underline{Z}_{0Mn}$  – взаимные сопротивления между линейными проводами на частоте  $n$ -й гармонической составляющей.

Понять физическую сущность передачи электрической энергии по трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения можно лишь на основании результатов всестороннего анализа этого процесса. В том числе на основании изучения режимов холостого хода и короткого замыкания линии электропередачи. В данном случае интерес вызывает режим холостого хода.

С учетом симметрии параметров анализируемого участка трехпроводной ЛЭП общий вид законов распределения фазных напряжений этого участка запишется так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{An} &= A_{A1n}e^{\gamma_n l} + A_{A2n}e^{-\gamma_n l}; \\ \dot{U}_{Bn} &= A_{B1n}e^{\gamma_n l} + A_{B2n}e^{-\gamma_n l}; \\ \dot{U}_{Cn} &= A_{C1n}e^{\gamma_n l} + A_{C2n}e^{-\gamma_n l}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $A_{A1n}, A_{A2n}, A_{B1n}, A_{B2n}, A_{C1n}$  и  $A_{C2n}$  – постоянные интегрирования для линий А, В и С соответственно;  $\gamma_n$  – постоянная распространения волн электромагнитного поля.

Ранее выполненные исследования свидетельствуют о том, что передача электрической энергии по трехпроводным линиям электропередачи осуществляется тремя парами волн электромагнитного поля [1 – 13]. Судя по формулам (1), передача электрической энергии по симметричному однородному участку трехфазной трехпроводной ЛЭП, входящей в состав симметричной ЭЭС, обеспечивается тремя равновеликими парами волн электромагнитного поля. В каждом линейном проводе присутствует одна пара волн: одна падающая и одна отраженная. Эти пары волн характеризуются одинаковыми постоянными распространения и фазовыми скоростями [14]. В этом случае справедливы традиционные методы прогнозирования передачи электрической энергии по трехфазным ЛЭП [15].

Формулы (1) представляют собой общий вид закона распределения фазного напряжения вдоль симметричного однородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП, входящей в состав симметричной ЭЭС. Эта формула повторяет закон распределения напряжения вдоль одно- и двухпроводной ЛЭП [2].

Общий вид распределения тока в линии А вдоль симметричного однородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП, входящей в состав симметричной ЭЭС, может быть представлен формулой:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An} &= -\frac{1}{\underline{Z}_{0Fn} - \underline{Z}_{0Mn}} \frac{d(A_{A1n}e^{\gamma_n l} + A_{A2n}e^{-\gamma_n l})}{dl} = \\ &= \frac{1}{\underline{Z}_{0Fn} - \underline{Z}_{0Mn}} \gamma_n (A_{A2n}e^{-\gamma_n l} - A_{A1n}e^{\gamma_n l}). \end{aligned} \quad (2)$$

С учетом того, что:

$$\gamma_n = \sqrt{(\underline{Z}_{0Fn} - \underline{Z}_{0Mn})(\underline{Y}_{0F0n} + 3\underline{Y}_{0Ln})},$$

уравнение (2) переписывается так:

$$\dot{I}_{An} = \sqrt{\frac{\underline{Y}_{0F0n} + 3\underline{Y}_{0Ln}}{\underline{Z}_{0Fn} - \underline{Z}_{0Mn}}} (A_{A2n}e^{-\gamma_n l} - A_{A1n}e^{\gamma_n l}).$$

На этом этапе следует ввести понятие о волновом сопротивлении исследуемого участка ЛЭП. В данном случае для линии А его величина определится так:

$$\underline{Z}_{cAn} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{0Fn} - \underline{Z}_{0Mn}}{\underline{Y}_{0F0n} + 3\underline{Y}_{0Ln}}}. \quad (3)$$

Волновые сопротивления других линейных проводов определяются точно так же:

$$\underline{Z}_{cAn} = \underline{Z}_{cBn} = \underline{Z}_{cCn} = \underline{Z}_{cn}.$$

В таком случае закон распределения линейного тока по линии А (2) с учетом формулы (3) предстанет в виде:

$$\dot{I}_{An} = \frac{A_{A1n}e^{\gamma_n l} + A_{A2n}e^{-\gamma_n l}}{\underline{Z}_{cn}}. \quad (4)$$

Законы распределения токов по двум другим линейным проводам трехпроводной ЛЭП определяются подобным образом.

Уравнения (1) и (4) иллюстрируют законы распределения фазных напряжений и линейного тока вдоль симметричного однородного участка трехпроводной ЛЭП, входящей в состав симметричной электроэнергетической системы. Для их реализации необходимо иметь сведения о численных значениях постоянных интегрирования. Этим же законам подчиняются напряжения и токи холостого хода.

Постоянные интегрирования  $A_{A2n}$ ,  $A_{A4n}$ ,  $A_{A6n}$ ,  $A_{B2n}$ ,  $A_{B4n}$ ,  $A_{B6n}$ ,  $A_{C2n}$ ,  $A_{C4n}$ , и  $A_{C6n}$  в равенствах (1) и (4) характеризуют начальные действующие значения падающих волн фазных напряжений, а постоянные интегрирования  $A_{A3n}$ ,  $A_{A5n}$ ,  $A_{B1n}$ ,  $A_{B3n}$ ,  $A_{B5n}$ ,  $A_{C1n}$ ,  $A_{C3n}$  и  $A_{C5n}$  – начальные действующие значения отраженных волн этих же напряжений.

На рис. 1 изображена такая схема распределения пары волн электромагнитного поля при разомкнутых линейных проводах в конце анализируемого участка ЛЭП, то есть в режиме холостого хода. Она иллюстрирует физическую сущность распространения волн электромагнитного поля по однородному участку ЛЭП при отключенной электрической нагрузке и устанавливает соотношения между постоянными интегрирования:

$$\left. \begin{aligned} A_{A1n} &= A_{A2n}e^{-2\gamma_n l_\Sigma}; \\ A_{B1n} &= A_{B2n}e^{-2\gamma_n l_\Sigma}; \\ A_{C1n} &= A_{C2n}e^{-2\gamma_n l_\Sigma}, \end{aligned} \right\}$$

где  $l_\Sigma$  – протяженность исследуемого участка ЛЭП.

В таком случае законы распределения фазных напряжений (1) вдоль анализируемого участка ЛЭП, входящего в состав симметричной ЭЭС, переписуются так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{An} &= A_{A2n} \left( e^{-2\gamma_n l_\Sigma} e^{\gamma_n l} + e^{-\gamma_n l} \right); \\ \dot{U}_{Bn} &= A_{B2n} \left( e^{-2\gamma_n l_\Sigma} e^{\gamma_n l} + e^{-\gamma_n l} \right); \\ \dot{U}_{Cn} &= A_{C2n} \left( e^{-2\gamma_n l_\Sigma} e^{\gamma_n l} + e^{-\gamma_n l} \right). \end{aligned} \right\}$$

Для начала анализируемого участка трехпроводной ЛЭП ( $l = 0$ ) эти уравнения переписуются так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1An} &= A_{A2n} \left( e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1 \right); \\ \dot{U}_{1Bn} &= A_{B2n} \left( e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1 \right); \\ \dot{U}_{1Cn} &= A_{C2n} \left( e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1 \right), \end{aligned} \right\}$$

где  $\dot{U}_{1An}$ ,  $\dot{U}_{1Bn}$  и  $\dot{U}_{1Cn}$  – фазные напряжения в начале анализируемого участка ЛЭП на частоте  $n$ -й гармонической составляющей.

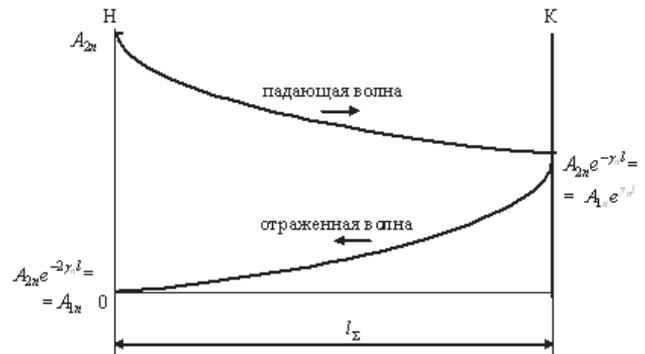


Рис. 1. Схема распределения пары волн электромагнитного поля по линейному проводу ЛЭП в режиме холостого хода

Это значит, что численные значения постоянных интегрирования можно определить из равенства:

$$\left. \begin{aligned} A_{A2n} &= \frac{\dot{U}_{1An}}{e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1}; \\ A_{B2n} &= \frac{\dot{U}_{1Bn}}{e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1}; \\ A_{C2n} &= \frac{\dot{U}_{1Cn}}{e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Численные значения других постоянных интегрирования определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} A_{A1n} &= \frac{\dot{U}_{1An}e^{-2\gamma_n l_\Sigma}}{e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1}; \\ A_{B1n} &= \frac{\dot{U}_{1Bn}e^{-2\gamma_n l_\Sigma}}{e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1}; \\ A_{C1n} &= \frac{\dot{U}_{1Cn}e^{-2\gamma_n l_\Sigma}}{e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

С учетом равенств (5) и (6) законы распределения напряжения и тока холостого хода в линии А предстанут в виде уравнений:

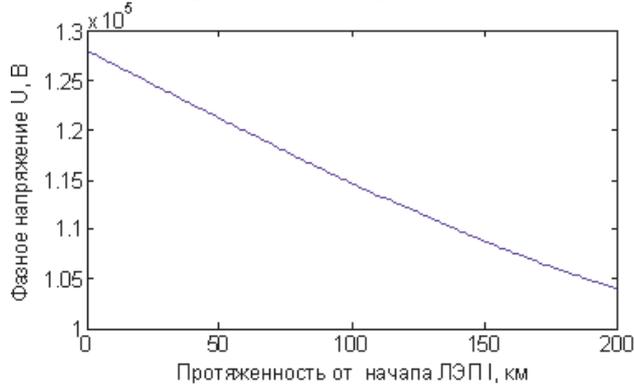
$$\dot{U}_{An} = \frac{\dot{U}_{1An}}{e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1} \left( e^{\gamma_n (l-2l_\Sigma)} + e^{-\gamma_n l} \right); \quad (7)$$

$$\dot{I}_{An} = \frac{\dot{U}_{1An}}{\underline{Z}_{cn} (e^{-2\gamma_n l_\Sigma} + 1)} \left( e^{-\gamma_n l} - e^{\gamma_n (l-2l_\Sigma)} \right). \quad (8)$$

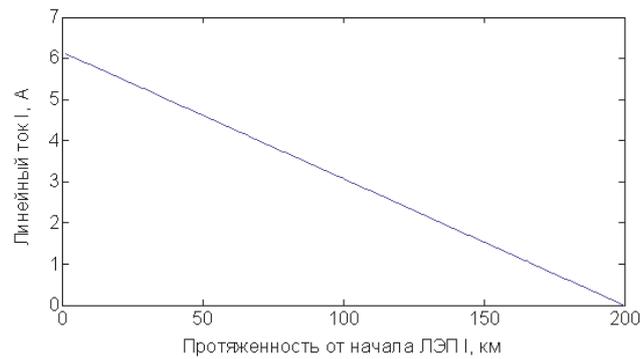
В других линиях напряжения и токи холостого хода определяются аналогично.

Наличие тока холостого хода в линиях обусловлено электромагнитными связями между линейными проводниками и конструктивными элементами исследуемой линии электропередачи.

Графические интерпретации законов распределения вдоль анализируемого участка ЛЭП напряжения и тока холостого хода на частоте основной гармонической составляющей представлены на рис. 2 и 3.



**Рис. 2.** Графическая интерпретация закона распределения напряжения холостого хода вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП-220 кВ на частоте основной гармонической составляющей



**Рис. 3.** Графическая интерпретация закона распределения тока холостого хода вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП-220 кВ на частоте основной гармонической составляющей

Графическая интерпретация распределения напряжения холостого на рис. 2 свидетельствует о проявлении признаков нелинейности этого распределения уже на участке протяженностью 200 км. Это вызвано сокращением длины волны при распространении электромагнитного поля по какой-либо материальной среде [6]. Ток в линии исследуемого участка ЛЭП (рис. 3) к концу анализируемого участка ЛЭП затухает практически до нуля, что свидетельствует о режиме холостого хода исследуемой линии электропередачи.

Для выполнения предлагаемого анализа распределения напряжений и токов вдоль трехпроводной ЛЭП, входящей в состав симметричной ЭЭС, необходимо иметь сведения о величине фазных напряжений в начале анализируемого участка линии электропередачи. Такие сведения не всегда доступны. Нередко известно лишь желаемое напряжение в конце линии.

В таком случае рассуждения будут несколько иные.

Судя по схеме распределения пары волн электромагнитного поля по линейному проводу, изображенной на рис. 1, для конца анализируемого участка трехпроводной ЛЭП справедливы равенства:

$$\left. \begin{aligned} A_{A1n} e^{\gamma_n l_\Sigma} &= A_{A2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma}; \\ A_{B1n} e^{\gamma_n l_\Sigma} &= A_{B2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma}; \\ A_{C1n} e^{\gamma_n l_\Sigma} &= A_{C2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Для конца участка ЛЭП ( $y = 0$ ) справедливо:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2An} &= A_{A1n} e^{\gamma_n l_\Sigma} + A_{A2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma}; \\ \dot{U}_{2Bn} &= A_{B1n} e^{\gamma_n l_\Sigma} + A_{B2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma}; \\ \dot{U}_{2Cn} &= A_{C1n} e^{\gamma_n l_\Sigma} + A_{C2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma}, \end{aligned} \right\}$$

где  $\dot{U}_{2An}$ ,  $\dot{U}_{2Bn}$  и  $\dot{U}_{2Cn}$  – фазные напряжения в конце анализируемого участка ЛЭП на частоте  $n$ -й гармонической составляющей.

С учетом равенства (9) эти уравнения переписываются так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2An} &= 2A_{A2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma}; \\ \dot{U}_{2Bn} &= 2A_{B2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma}; \\ \dot{U}_{2Cn} &= 2A_{C2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma}. \end{aligned} \right\}$$

Это значит, что:

$$\left. \begin{aligned} A_{A2n} &= \frac{\dot{U}_{2An}}{2e^{-\gamma_n l_\Sigma}}; \\ A_{B2n} &= \frac{\dot{U}_{2Bn}}{2e^{-\gamma_n l_\Sigma}}; \\ A_{C2n} &= \frac{\dot{U}_{2Cn}}{2e^{-\gamma_n l_\Sigma}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{A1n} &= \frac{\dot{U}_{2An} e^{-\gamma_n l_\Sigma}}{2}; \\ A_{B1n} &= \frac{\dot{U}_{2Bn} e^{-\gamma_n l_\Sigma}}{2}; \\ A_{C1n} &= \frac{\dot{U}_{2Cn} e^{-\gamma_n l_\Sigma}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Законы распределения фазных напряжений так же, как и напряжение холостого хода, формируются из сумм падающей и отраженной волн электромагнитного поля. Судя по рис. 1, эти законы при известных фазных напряжениях в конце анализируемого участка ЛЭП можно представить так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{An} &= A_{A1n} e^{\gamma_n l_\Sigma} e^{-\gamma_n y} + A_{A2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma} e^{\gamma_n y}; \\ \dot{U}_{Bn} &= A_{B1n} e^{\gamma_n l_\Sigma} e^{-\gamma_n y} + A_{B2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma} e^{\gamma_n y}; \\ \dot{U}_{Cn} &= A_{C1n} e^{\gamma_n l_\Sigma} e^{-\gamma_n y} + A_{C2n} e^{-\gamma_n l_\Sigma} e^{\gamma_n y}. \end{aligned} \right\}$$

С учетом равенств (10) и (11) эти законы переписываются так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \frac{1}{2} \left( \dot{U}_{2An} e^{-\gamma_n y} + \dot{U}_{2An} e^{\gamma_n y} \right); \\ \dot{U}_{Bn} &= \frac{1}{2} \left( \dot{U}_{2Bn} e^{-\gamma_n y} + \dot{U}_{2Bn} e^{\gamma_n y} \right); \\ \dot{U}_{Cn} &= \frac{1}{2} \left( \dot{U}_{2Cn} e^{-\gamma_n y} + \dot{U}_{2Cn} e^{\gamma_n y} \right). \end{aligned} \right\}$$

Или иначе:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \dot{U}_{2An} \operatorname{ch} \gamma_n y; \\ \dot{U}_{Bn} &= \dot{U}_{2Bn} \operatorname{ch} \gamma_n y; \\ \dot{U}_{Cn} &= \dot{U}_{2Cn} \operatorname{ch} \gamma_n y. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Графическая интерпретация законов распределения напряжений холостого хода вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП, входящей в состав симметричной ЭЭС, от его конца на частоте основной гармонической составляющей, определяемые по формулам (12), не отличаются от изображений на рис. 2.

Законы распределения линейных токов, а, значит, и токов холостого хода, в таком случае предстанут в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{An} &= -\frac{\dot{U}_{2An}}{Z_{cn}} \operatorname{sh} \gamma_n y; \\ \dot{I}_{Bn} &= -\frac{\dot{U}_{2Bn}}{Z_{cn}} \operatorname{sh} \gamma_n y; \\ \dot{I}_{Cn} &= -\frac{\dot{U}_{2Cn}}{Z_{cn}} \operatorname{sh} \gamma_n y. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Графическая интерпретация законов распределения токов холостого хода вдоль симметричного однородного участка трехпроводной ЛЭП, входящей в состав симметричной ЭЭС, от его конца на частоте основной гармонической составляющей, определяемые по формулам (13), в принципе, не отличается от изображения на рис. 3.

Трактовка этих законов зависит от величин первичных параметров анализируемого участка ЛЭП и не зависит от нагрузки, которая может быть подключена к исследуемой линии электропередачи. Этот факт дает право использовать предлагаемую методику для оценивания пропускной способности трехпроводной ЛЭП.

Для того, чтобы оценить напряжения и токи, распространяемые по трехпроводным ЛЭП при подключении к ним той или иной электрической нагрузки, необходимо воспользоваться рекомендациями, изложенными в [14].

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что симметрия электроэнергетической системы, в состав которой входит анализируемая ЛЭП, вносит существенные упрощения и способствует повышению достоверности прогнозирования распределения напряжений и токов по участкам этой линии электропередачи. Это позволит понять физическую сущность процесса передачи электрической энергии по трехфазной линии электропередачи трехпроводного исполнения и, следовательно, повысить надежность и качество электропитания промышленных и иных объектов.

## Литература

1. Костенко В.А., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272 с.
2. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии по участкам электроэнергетических систем: моногр. В 2 кн. Братск: БрГУ, 2006. 807 с.
3. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетической системы // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2006. № 2. С. 129-140.
4. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Распределение гармонических составляющих электрической энергии пониженного качества вдоль несимметричного участка трехфазной ВЛЭП трехпроводного исполнения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2010. Т. 1. С. 20-25.
5. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Распределение электрической энергии пониженного качества по трехфазной магистральной линии электропередачи трехпроводного исполнения. // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. 2008. № 3 (39). С. 130-134.
6. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по линии электропередачи: моногр. Братск: Изд-во БрГУ, 2011. 64 с.
7. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по однородному трехфазному трехпроводному участку ЛЭП // Научный вестник Новосиб. гос. техн. ун-та. 2009. № 2. С. 135-144.
8. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной линии электропередачи // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 4. С. 197-204.
9. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной линии электропередачи // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4 (28). С. 197-204.
10. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2006. Т. 2. С. 129-140.
11. Большанин Г.А. Особенности транспортировки электрической энергии по трехпроводным линиям электропередачи // Там же. 2010. Т. 2. С. 64-68.
12. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Особенности распространения электрической энергии по многопроводным линиям электропередачи // Там же. 2011. Т. 2. С. 38-43.
13. Большанин Г.А. Способ прогнозирования распределения гармонических составляющих электрической энергии по неразветвленным участкам электроэнергетической системы: пат. 2210154 Рос. Федерации № 2001106402; заявл. 06.03.01; опубл. 10.08.03, Бюл. № 22. 14 с.
14. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Передача электрической энергии по однородному участку трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения, входящему в состав симметричной ЭЭС // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2011. № 10 (57). С. 179-186.
15. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 488 с.

## References

1. Kostenko V.A. Perelman L.S., Shkarin Yu.P. Wave processes and electrical interference in multiconductor high voltage transmission lines. M.: Energija, 1973. 272 p.
2. Bolsharin G.A. Distribution of electric energy on sections of electrical power systems: monograph. 2 vol. Bratsk: BrGU, 2006. 807 p.
3. Bolsharin G.A. Distribution of electric energy of the lowered quality on sections of electrical power system // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2006. Vol. 2. P. 129-140.
4. Bolsharin G.A. Bolsharina L.Yu. Maryasova E.G. Distribution of harmonious components of electric energy of the lowered quality along an asymmetrical section of three-phase three-wire high-voltage power transmission line. // Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost. 2010. Vol. 1. P. 20-25.

5. Bolshanin, G.A., Bolshanina L.Yu. Distribution of electric energy of the lowered quality on a three-phase three-wire main power line. // Vestn. Izhev. gos. tehn. un-ta. 2008. № 3 (39). P. 130-134.
6. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Features of electric energy distribution on a power line: monograph. Bratsk: izd-vo BrGU, 2011. 64 p.
7. Bolshanin G.A. Distribution of electric energy of the lowered quality on a uniform three-phase three-wire section of the high voltage line // Nauchnyj vestnik Novosib. gos. tehn. un-ta. 2009. № 2. P. 135-144.
8. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Maryasova E.G. Features of distribution of electric energy on a three-wire power line // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2009. № 4. P. 197-204.
9. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Features of distribution of electric energy on a three-wire power line // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2010. No. 4 (28). Page 197-204.
10. Bolshanin G.A. Distribution of electric energy of the lowered quality on sections of electrical power systems // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2006. Vol. 2. P. 129-140.
11. Bolshanin G. A. Features of transportation of electric energy on three-wire power lines // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2010. Vol. 2. P. 64-68.
12. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Maryasova E.G. Features of distribution of electric energy on multiwire power lines // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2011. Vol. 2. P. 38-43.
13. Bolshanin G. A. Forecasting way of harmonious components distribution of electric energy in unbranched sections of electrical power system: pat. 2210154 Rus. Federation № 2001106402; decl. 06.03.01; publ. 10.08.03, Bull. № 22. 14 p.
14. Bolshanin G.A. Bolshanina L.Yu. Maryasova E.G. Electric energy transferring on homogeneous section of three-phase three-wire high voltage line, being a part of symmetric electric power system // Vestn. Irkut. gos. tehn. un-ta. 2011. № 10 (57). P. 179-186.
15. Ryzhov Yu.P. Distant electricity transmissions of ultrahigh tension. M.: Izd. dom MEI, 2007. 488 p.

УДК 621.311.004.12

## Способ расчета коэффициентов восьмиполюсника, замещающего однородный участок трехпроводной линии электропередачи

Г.А. Большанин<sup>a</sup>, Л.Ю. Большанина<sup>b</sup>, Е.Г. Марьясова<sup>c</sup>

Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>a</sup>bolshaning@mail.ru, <sup>b</sup>brstu@bk.ru, <sup>c</sup>markageo@mail.ru

Статья поступила 28.11.2013, принята 25.01.2014

*Представлена схема замещения однородного участка трехпроводной линии электропередачи в виде восьмиполюсника. Фазные напряжения и линейные токи можно определить через коэффициенты этого восьмиполюсника. Восьмиполюсник описывается шестью уравнениями. Коэффициенты восьмиполюсника можно определить, зная вторичные параметры ЛЭП. Здесь предложена методика определения коэффициентов этого восьмиполюсника из серии опытов холостого хода и короткого замыкания. В эксперименте участвуют: источник трехфазной ЭДС, желательного пониженного напряжения; шесть вольтметров; шесть амперметров; шесть фазометров; двенадцать коммутрующих устройств, в качестве которых могут быть использованы обычные выключатели или рубильники.*

**Ключевые слова:** восьмиполюсник, трехфазная трехпроводная линия электропередачи, коэффициенты восьмиполюсника, опыт холостого хода, опыт короткого замыкания.

## Calculation method of coefficients of the eight-terminal circuit, substituting a homogeneous section of the three-wire power line

G.A. Bolshanin<sup>a</sup>, L. Yu. Bolshanina<sup>b</sup>, E.G. Maryasova<sup>c</sup>

Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup>bolshaning@mail.ru, <sup>b</sup>brstu@bk.ru, <sup>c</sup>markageo@mail.ru

Received 28.11.2013, accepted 25.01.2014

*The circuit of substitution of a homogeneous section of the three-wire power line has been shown in the form of the eight-terminal circuit. Phase voltages and linear currents can be defined through coefficients of the eight-terminal circuit. The eight-terminal circuit is presented by six equations. Coefficients of the eight-terminal circuit can be defined, knowing secondary parameters of the high voltage line. The article proposes a method of determination of coefficients of the eight-terminal circuit from the set of open-circuit tests and short-circuit tests. A source of three-phase EMF of lower voltage (desirable), six voltage meters, six amperimeters, six phasemeters and twelve contact elements, such as circuit switches or circuit breakers, have been involved in the experiment.*

**Keywords:** eight-terminal circuit, three-phase three-wire power line, coefficients of the eight-terminal circuit, open-circuit test, short-circuit test.