



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.004.12

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-90-100>

Методика определения электрических параметров с учетом волновой теории передачи электрической энергии

© Г.А. Большанин

Братский государственный университет, г. Братск, Российская Федерация

Резюме: Предложена методика прогнозирования распределения гармонических составляющих напряжений и токов в линиях электропередачи трехпроводного исполнения, работающих в режиме передачи электрической энергии потребителю. Показано, что передача электрической энергии потребителю обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля, а скорость передачи этой энергии определяется первичными параметрами соответствующей линии электропередачи. Скорость передачи электрической энергии по линейным проводам линии электропередачи определяется скоростью распространения волн электромагнитного поля в материальной среде. Показано, что длина волны электромагнитного поля и скорость его распространения по линейным проводам линии электропередачи заметно меньше, чем длина волны и скорость распространения этого поля в вакууме. Приведен пример расчета и визуального определения длины волны электромагнитного поля в линейных проводах линии электропередачи трехпроводного исполнения. Представлена схема распространения амплитудных значений волн электромагнитного поля по линейному проводу линии электропередачи трехпроводного исполнения. Передача электрической энергии по линии электропередачи трехпроводного исполнения представляет собой сложный колебательный процесс. Это подтверждено графической интерпретацией распределения фазного напряжения вдоль линии электропередачи трехпроводного исполнения. Отмечен тот факт, что передача электрической энергии по линейному проводу однородного участка линии электропередачи трехпроводного исполнения может быть представлена как распространение результирующей волны, полученной в итоге наложения трех падающих и трех отраженных волн электромагнитного поля. Представлены иллюстрации амплитудно-частотных характеристик по напряжению и току.

Ключевые слова: волны электромагнитного поля, первичные параметры, длина волны, фазовая скорость, фазное напряжение, линейный ток

Информация о статье: Дата поступления 01 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 18 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Большанин Г.А. Методика определения электрических параметров с учетом волновой теории передачи электрической энергии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):90–100. DOI: [10.21285/1814-3520-2019-1-90-100](http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-90-100).

Determination methods of electric parameters considering the electric energy wave transmission theory

Georgy A. Bolshanin

Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation

Abstract: The article proposes methods predicting the distribution of harmonic components of voltages and currents in three-wire power transmission lines operating in the mode of electric energy transmission to consumers. It is shown that the transmission of electric energy to consumers is provided by three pairs of waves of an electromagnetic field, while this energy transmission rate is determined by the primary parameters of the corresponding power transmission line. The electrical energy transmission rate through linear wires of the power transmission line is determined by the propagation velocity of electromagnetic field waves in a material medium. It is shown that the wavelength of the electromagnetic field and its propagation velocity along the linear wires of the power transmission line are much less than the wavelength and the propagation velocity of this field in vacuum. An example of calculation and visual determination of the electromagnetic field wavelength in linear wires of a three-wire power transmission line is given. A propagation diagram of electromagnetic field wave amplitude values along a linear wire of a three-wire transmission line is presented. Electrical energy transmission through the three-wire power transmission line is a complex oscillation process. This is confirmed by a graphical interpretation of phase voltage distribution along the three-wire power transmission line. It is noted that electrical energy transmission through a linear wire of a homogeneous section of the three-wire power transmission line can be represented as a propagation of the resultant wave obtained due to the superposition of three incident and three reflected waves of the electromagnetic field. Illustrations of amplitude-frequency characteristics for voltage and current are presented.



Keywords: electromagnetic field waves, primary parameters, wavelength, phase velocity, phase voltage, linear current

Information about the article: Received December 01, 2018; accepted for publication January 18, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Bolshann G.A. Determination methods of electric parameters considering the electric energy wave transmission theory. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):90–100. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-90-100.

Введение

Традиционно электрическая энергия доставляется потребителям линиями электропередачи (ЛЭП). Основу ЛЭП составляют провода, изготовленные из проводящих материалов – металлов. Чаще всего это – сталь, алюминий, медь и т.п. При небольших по величине токах эти материалы обладают неявно выраженной нелинейностью. Для токоведущих частей ЛЭП границы линейности и нелинейности определены величинами допустимых токов, указанных в соответствующих справочных материалах^{1,2}. В этих и других литературных источниках не рекомендуется при эксплуатации ЛЭП превышать допустимые токи. Таким образом, токоведущие части линий электропередачи эксплуатируются в основном в линейной области вольтамперных характеристик материалов, из которых изготовлены линейные провода ЛЭП. Передача электрической энергии по проводам ЛЭП осуществляется вследствие распространения электромагнитного поля в линейной среде [1]. Известно, что в линейной среде электромагнитное поле распространяется по гармоническим законам³. Но тогда и электрическая энергия по проводам ЛЭП распространяется по подобным законам.

В материальной среде, каковыми являются провода ЛЭП, скорость распространения электромагнитного поля значительно меньше 300000 км/с. Следовательно, и длина волны на частоте основной гармонической составляющей электромагнитного поля, распространяемого по линейным проводам ЛЭП, меньше 6000 км. Исследования показали, что длина волны электромагнитного поля по материальной среде зависит от величины коэффициента фазы [2].

Передача электрической энергии потребителю по однородному участку трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля [2–4]. Электрическая энергия от начала этого участка передается тремя падающими волнами электромагнитного поля. Затем часть энергии передается дальше потребителю, а другая часть энергии отраженными волнами электромагнитного поля возвращается в начало анализируемого участка ЛЭП. Этот процесс наиболее полно иллюстрируется уравнениями распределения линейных токов на частоте n -й гармонической составляющей вдоль однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения:

$$I_A = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{A2i} e^{-\gamma_i l}}{Z_{cAi}} - \frac{A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{Z_{cAi}} + \frac{A_{B2i} e^{-\gamma_i l}}{Z_{cAbi}} - \frac{A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{Z_{cAbi}} + \frac{A_{C2i} e^{-\gamma_i l}}{Z_{cCa}} - \frac{A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{Z_{cCa}} \right) \right]; \quad (1)$$

¹Электротехнический справочник в 4-х т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. (глав. ред. А.И. Попов). 9-е изд., стер. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 964 с. / Electrotechnical reference book in 4 volumes. Vol. 3. Production, transmission and distribution of electrical energy / Under total edition of V.G. Gerasimov et al. (Chief Editor A.I. Popov). 9th edition, stereotyped. M.: MEI Publ., 2004. 964 p.

²Справочник по электроснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / Под общ. ред. С.И. Гамазина, Б.И. Кудрина, С.А. Цырука. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 745 с. / Handbook of Electrical Energy Supply and Electrical Equipment of Industrial Enterprises and Public Buildings / Under total edition of S.I. Gamazin, B.I. Kudrin, S.A. Tsyruk. M.: MEI Publ., 2010. 745 p.

³Физический энциклопедический словарь. Т. 5. / Глав. ред. Б.А. Введенский, Б.М. Вул. М.: Советская энциклопедия, 1966. 576 с. / Physical encyclopedic dictionary. Vol. 5. / Chief Editor B.A. Vvedensky, B.M. Vul. M.: Soviet Encyclopedia, 1966. 576 p.



$$\dot{I}_B = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{B2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBi}} - \frac{A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBi}} + \frac{A_{A2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cABi}} - \frac{A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cABi}} + \frac{A_{C2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} - \frac{A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} \right) \right]; \quad (2)$$

$$\dot{I}_C = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{C2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCi}} - \frac{A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCi}} + \frac{A_{A2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCAi}} - \frac{A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCAi}} + \frac{A_{B2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} - \frac{A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} \right) \right], \quad (3)$$

где A_{A2i} и $A_{A(2i-1)}$, A_{B2i} и $A_{B(2i-1)}$, A_{C2i} и $A_{C(2i-1)}$ – пофазные постоянные интегрирования, характеризующие отраженные и падающие волны i -й пары волн электромагнитного поля; γ_i – постоянная распространения i -й пары волн электромагнитного поля; \underline{Z}_{cAi} , \underline{Z}_{cBi} и \underline{Z}_{cCi} – собственные волновые сопротивления линейных проводов A , B и C i -й паре волн электромагнитного поля; \underline{Z}_{cABi} , \underline{Z}_{cBCi} и \underline{Z}_{cCAi} – взаимные волновые сопротивления между линейными проводами i -й пары волн электромагнитного поля; l – протяженность рассматриваемого участка ЛЭП.

Получается, что действительно в передаче электрической энергии по каждому линейному проводу участвует три пары волн, обусловленных собственными параметрами каждого линейного провода, и шесть пар волн электромагнитного поля, наведенного от соседних проводов, обусловленных электромагнитными связями между линейными проводами.

Схема распределения амплитудных значений первой (условно) пары волн электромагнитного поля вдоль линейного провода А однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения, протяженностью l_Σ на частоте n -й гармонической составляющей, изображена на рис. 1 [2]. Здесь видно, что каждая пара волн электромагнитного поля присутствует во всех трех линейных проводах. Поэтому в одном линейном проводе однородного участка трехпроводной ЛЭП от каждой пары волн электромагнитного поля имеют место три падающих и три отраженных волн: одна падающая и одна отраженная от собственных параметров этого провода, две падающих и две отраженных через электромагнитные связи от соседних проводов.

Итак, первые пары волн, как и вторые, и третьи, в каждом линейном проводе делятся в свою очередь на три пары: одна пара собственных и две пары взаимных. Часть электрической энергии, переносимая каждой падающей волной от начала анализируемого однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения к ее концу, передается далее потребителю. Другая часть электрической энергии отраженными волнами – одной собственной и двумя взаимными – передается обратно к концу анализируемого участка ЛЭП.

В качестве потребителя электрической энергии следует принимать ту часть электроэнергетической системы, которая расположена за пределами конца рассматриваемого участка ЛЭП.

Передаваемая потребителю по линейному проводу А электрическая энергия на рис. 1 характеризуется током $\dot{I}_{2An}^{(1)}$, определяемым суммой от каждой падающей волны:

$$\dot{I}_{2An}^{(1)} = \dot{I}_{2An}^{(1A)} + \dot{I}_{2An}^{(1B)} + \dot{I}_{2An}^{(1C)},$$

где $\dot{I}_{2An}^{(1A)}$, $\dot{I}_{2An}^{(1B)}$ и $\dot{I}_{2An}^{(1C)}$ – токи от первых пар волн в линейном проводе А от собственных параметров линейных проводов А, В и С, соответственно, на частоте n -й гармонической составляющей.

Это только от первой пары волн электромагнитного поля. От второй и третьей пар волн по линейному проводу А потребителю тоже передается определенная часть электрической энергии, характеризуемая токами:



$$\dot{I}_{2An}^{(2)} = \dot{I}_{2An}^{(2A)} + \dot{I}_{2An}^{(2B)} + \dot{I}_{2An}^{(2C)};$$

$$\dot{I}_{2An}^{(3)} = \dot{I}_{2An}^{(3A)} + \dot{I}_{2An}^{(3B)} + \dot{I}_{2An}^{(3C)},$$

где $\dot{I}_{2An}^{(2A)}$, $\dot{I}_{2An}^{(2B)}$ и $\dot{I}_{2An}^{(2C)}$ – токи от второй пары волн в линейном проводе А от собственных параметров линейных проводов А, В и С; $\dot{I}_{2An}^{(3A)}$, $\dot{I}_{2An}^{(3B)}$ и $\dot{I}_{2An}^{(3C)}$ – токи от третьей пары волн в линейном проводе А от собственных параметров линейных проводов А, В и С на частоте n -й гармонической составляющей.

Весь линейный ток в линейном проводе А (потребителю) определяется суммой:

$$\dot{I}_{2An} = \frac{1}{3} (\dot{I}_{2An}^{(1)} + \dot{I}_{2An}^{(2)} + \dot{I}_{2An}^{(3)}).$$

ИЛИ:

$$\dot{I}_{2An} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{A_{A2in}}{\underline{Z}_{cAin}} + \frac{A_{B2in}}{\underline{Z}_{cABin}} + \frac{A_{C2in}}{\underline{Z}_{cCAin}} \right) e^{-\gamma_{in} l_{\Sigma}} - \left(\frac{A_{A(2i-1)n}}{\underline{Z}_{cAin}} + \frac{A_{B(2i-1)n}}{\underline{Z}_{cABin}} + \frac{A_{C(2i-1)n}}{\underline{Z}_{cCAin}} \right) e^{\gamma_{in} l_{\Sigma}} \right]. \quad (4)$$

Численные значения постоянных интегрирования A_{A2in} и $A_{A(2i-1)n}$ рассчитываются по методике, изложенной в [2].

Все это справедливо для наблюдателя, находящегося в начале исследуемого участка линии электропередачи.

Аналогичные расчеты можно провести и для наблюдателя, находящегося в конце анализируемого участка трехпроводной ЛЭП, взяв за основу для расчета уравнения:

$$\dot{U}_{An} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (B_{A(2i-1)n} e^{-\gamma_{in} y} + B_{A2in} e^{\gamma_{in} y}); \quad (5)$$

$$\dot{U}_{Bn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (B_{B(2i-1)n} e^{-\gamma_{in} y} + B_{B2in} e^{\gamma_{in} y}); \quad (6)$$

$$\dot{U}_{Cn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (B_{C(2i-1)n} e^{-\gamma_{in} y} + B_{C2in} e^{\gamma_{in} y}), \quad (7)$$

где y – расстояние от конца анализируемого участка ЛЭП до места, где необходимо определить напряжение; B_{A2i} и $B_{A(2i-1)}$, B_{B2i} и $B_{B(2i-1)}$, B_{C2i} и $B_{C(2i-1)}$ – постоянные интегрирования.

Уравнения распределения линейных токов от конца однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения аналогичны уравнениям (1)–(3), для линии А имеют вид:

$$\dot{I}_A = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{B_{A2i} e^{-\gamma_i y}}{\underline{Z}_{cAi}} - \frac{B_{A(2i-1)} e^{\gamma_i y}}{\underline{Z}_{cAi}} + \frac{B_{B2i} e^{-\gamma_i y}}{\underline{Z}_{cABi}} - \frac{B_{B(2i-1)} e^{\gamma_i y}}{\underline{Z}_{cABi}} + \frac{B_{C2i} e^{-\gamma_i y}}{\underline{Z}_{cCAi}} - \frac{B_{C(2i-1)} e^{\gamma_i y}}{\underline{Z}_{cCAi}} \right) \right]. \quad (8)$$

Из уравнений (4) и (8) видно, что на формирование каждого линейного тока оказывают влияние токи соседних линий. Соседние линии оказывают влияние и на формирование фазных

напряжений через постоянные интегрирования A_{A2i} и $A_{A(2i-1)}$, A_{B2i} и $A_{B(2i-1)}$, A_{C2i} и $A_{C(2i-1)}$ или B_{A2i} и $B_{A(2i-1)}$, B_{B2i} и $B_{B(2i-1)}$, B_{C2i} и $B_{C(2i-1)}$.

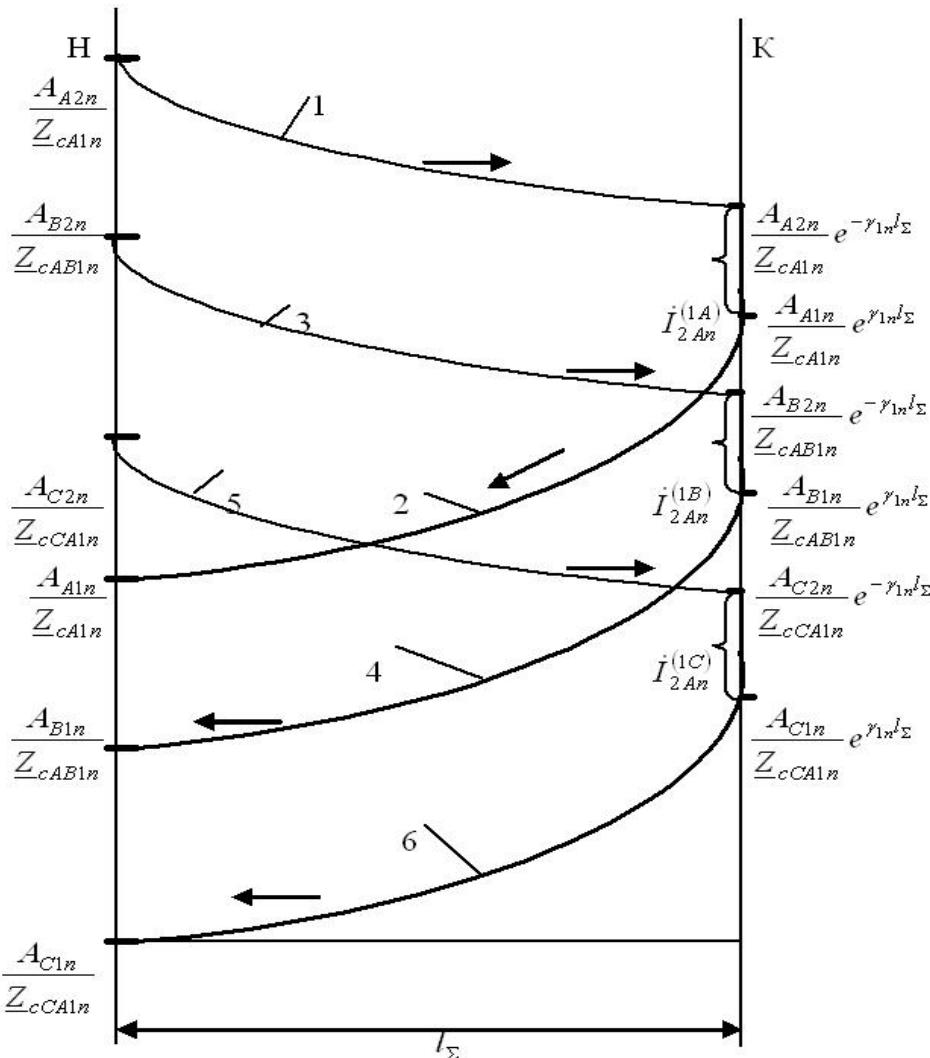


Рис. 1. Схема распределения амплитудных значений первых пар падающих и отраженных волн электромагнитного поля по линейному проводу А однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения: 1 – собственная падающая волна; 2 – собственная отраженная волна; 3 – наведенная падающая волна от линейного провода В; 4 – наведенная отраженная волна от линейного провода В; 5 – наведенная падающая волна от линейного провода С; 6 – наведенная отраженная волна от линейного провода С

Fig. 1. Distribution diagram of the amplitude values of the first pairs of incident and reflected waves of the electromagnetic field by the linear wire A of the homogeneous section of the three-phase three-wire transmission line: 1 – own incident wave; 2 – own reflected wave; 3 – induced incident wave from the linear wire B; 4 – induced reflected wave from the linear wire B; 5 – induced incident wave from the linear wire C; 6 – induced reflected wave from the linear wire C

На основании результатов вычисления постоянных интегрирования, используя уравнения (5)–(7) или (8), можно выполнить прогнозирование напряжений и токов в любом месте однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения, отстающих от его конца на расстоянии y .

Пусть анализу подлежит однородный участок трехфазной ЛЭП-220 кВ трехпроводного исполнения протяженностью 300 км. Его ориентировочные первичные параметры на частоте основной гармонической составляющей [2, 5–14]:



$$R_{0An} = 0,42 \text{ Ом/км}; \quad R_{0Bn} = 0,40 \text{ Ом/км}; \quad R_{0Cn} = 0,43 \text{ Ом/км};$$

$$L_{0An} = 1,3369 \text{ мГн/км}; \quad L_{0Bn} = 1,3215 \text{ мГн/км}; \quad L_{0Cn} = 1,3300 \text{ мГн/км};$$

$$M_{0ABn} = 7,488 \text{ Гн/км}; \quad M_{0BCn} = 7,489 \text{ Гн/км}; \quad M_{0CA_n} = 7,487 \text{ Гн/км};$$

$$C_{0A0n} = 10^{-8} \text{ мкФ/км}; \quad C_{0B0n} = 8,5 \cdot 10^{-9} \text{ мкФ/км}; \quad C_{0C0n} = 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ мкФ/км};$$

$$C_{0ABn} = 8 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}; \quad C_{0BCn} = 7 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}; \quad C_{0CA_n} = 9 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}.$$

Передача электрической энергии по анализируемому участку ЛЭП обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля, каждая из которых характеризуется своей постоянной распространения. На частоте основной гармонической составляющей они имеют следующие значения:

$$\gamma_{1n} = (0 - j10) \text{ км}^{-1};$$

$$\gamma_{2n} = (0 + j) \text{ км}^{-1};$$

$$\gamma_{3n} = (0 + j10) \text{ км}^{-1}.$$

Вещественные составляющие постоянных распространения волн электромагнитного поля определяют коэффициенты затухания каждой пары этих волн. В данном случае коэффициенты затухания волн электромагнитного поля в проводах ЛЭП настолько малы, что в выполнении исследования им были присвоены нулевые значения. Однако результирующая волна электромагнитного поля, получившаяся из результата сложения шести волн электромагнитного поля с нулевым затуханием, все-таки затухает.

Мнимые составляющие постоянных распространения волн электромагнитного поля определяют коэффициенты фазы. В рассматриваемом случае они оказались сравнительно велики. Большая величина коэффициентов фаз соответствует малой длине волн электромагнитного поля. Тем более длине результирующей волны. Именно этим обстоятельством вызван колебательный процесс распределения напряжения и тока вдоль линейного провода однородного участка анализируемой трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения.

Фазовая скорость тока падающей (отраженной) результирующей волны электромагнитного поля даже на частоте основной гармонической составляющей сравнительно мала:

$$\nu = \frac{2\pi f}{\alpha} = \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 50}{4,64} = 67,71 \text{ км/с},$$

где $\alpha = \sqrt[3]{\operatorname{Im}(\gamma_{1n}) \cdot \operatorname{Im}(\gamma_{2n}) \cdot \operatorname{Im}(\gamma_{3n})} = \sqrt[3]{10 \cdot 1 \cdot 10} = 4,64 \text{ км}^{-1}$ – усредненный коэффициент фазы, который можно принять за коэффициент фазы результирующей волны электромагнитного поля.

Результирующая волна результирующего поля есть результат наложения шести волн. Поэтому длина результирующей волны зависит от фазового сдвига этих волн между собой. Минимально возможную длину волны определяют по формуле:

$$\lambda_{\min} = \frac{\nu}{af} = \frac{67,71}{6 \cdot 50} = 0,23 \text{ км}.$$



Максимально возможная длина результирующей волны электромагнитного поля определяется по формуле:

$$\lambda_{\max} = \frac{v}{f} = \frac{67,71}{50} = 1,35 \text{ км.}$$

Длина результирующей волны электромагнитного поля оказалась очень мала. Для ее достоверного выяснения необходимо рассмотреть однородный участок анализируемой ЛЭП сравнительно малой протяженности. Например, 10 км. Как это сделано на рис. 2, где представлена графическая интерпретация распределения фазного напряжения на частоте основной гармонической составляющей вдоль однородного участка трехфазной линии электропередачи трехпроводного исполнения протяженностью десять километров.

По рис. 2 видно, что распределение фазного напряжения вдоль анализируемого участка ЛЭП представляет собой сложный колебательный процесс. Он представляет собой совокупность колебаний различных амплитуд с вполне стабильным периодом порядка 0,6 км. Это значит, что длина результирующей волны электромагнитного поля 0,6 км. Это вполне соответствует неравенству:

$$\lambda_{\max} = 1,35 \text{ км} > \lambda = 0,6 \text{ км} > \lambda_{\min} = 0,23 \text{ км.}$$

Подобный результат визуального определения длины результирующей волны электромагнитного поля может быть получен и из графической интерпретации распределения линейного тока по тому же участку ЛЭП. Численное значение этого результата может отличаться от 0,6 км, но, тем не менее, оно будет удовлетворять неравенству $\lambda_{\max} > \lambda > \lambda_{\min}$.

Получается, что длина результирующей волны электромагнитного поля в каждом линейном проводе ЛЭП определяется первичными параметрами исследуемой линии электропередачи.

Представление о результатах передачи электрической энергии по анализируемой ЛЭП дают и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) напряжения и тока. АЧХ определяется зависимостью модулей передаточных функций от частоты.

Спектральные плотности выходных характеристик электрической энергии определяются по формулам:

$$U_{2A}(j\omega) = -\frac{U_{2An}\sqrt{2}}{n\omega}(\cos \varphi_{u2An} - j \sin \varphi_{u2An});$$
$$I_{2A}(j\omega) = -\frac{I_{1An}\sqrt{2}}{n\omega}(\cos \varphi_{i2An} - j \sin \varphi_{i2An}),$$

где φ_{u2An} и φ_{i2An} – начальные фазы напряжения фазы А и тока в линии А на частоте n -й гармонической составляющей в конце анализируемого участка ЛЭП.

Спектральные плотности входных характеристик электрической энергии определяются по формулам:

$$U_{1A}(j\omega) = -\frac{U_{An}\sqrt{2}}{n\omega}(\cos \varphi_{uAn} - j \sin \varphi_{uAn});$$

$$I_{1A}(j\omega) = -\frac{I_{An}\sqrt{2}}{n\omega}(\cos \varphi_{iAn} - j \sin \varphi_{iAn}),$$



где φ_{uAn} и φ_{iAn} – начальные фазы напряжения фазы А и тока в линии А на частоте n -й гармонической составляющей.

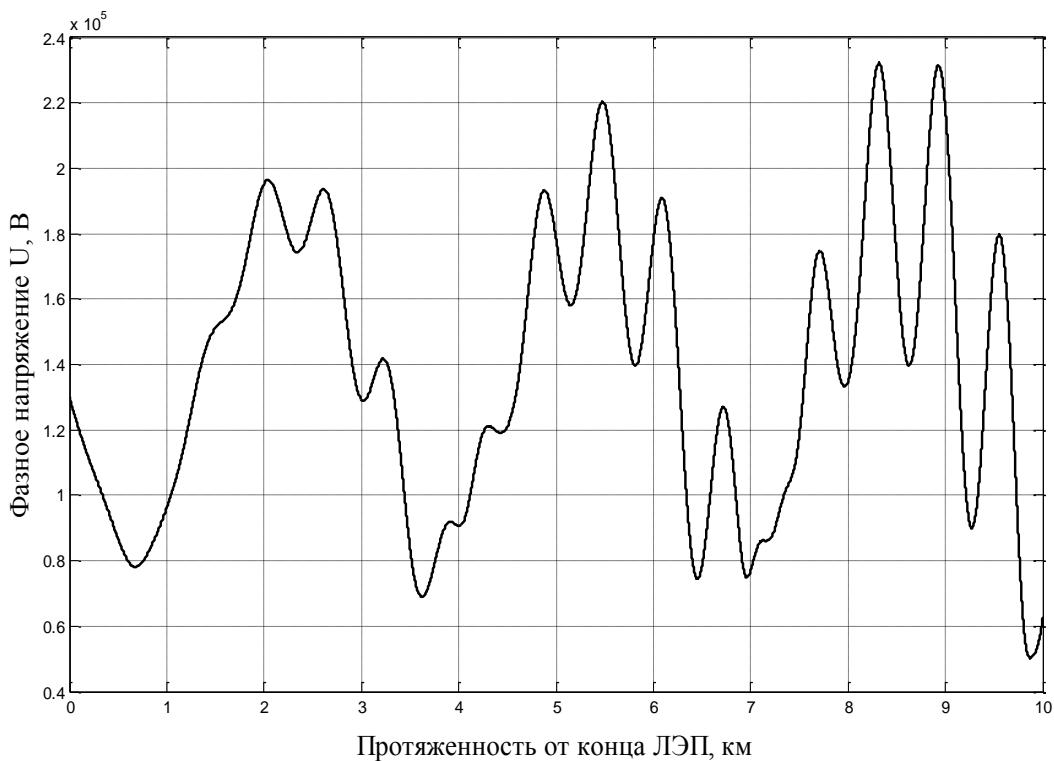


Рис. 2. Графическая интерпретация распределения фазного напряжения от конца однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте основной гармонической составляющей

Fig. 2. Graphical interpretation of phase voltage distribution from the end of the homogeneous section of the three-wire transmission line at the frequency of the main harmonic component

Напряжение \dot{U}_{An} и ток \dot{I}_{An} определяются из уравнений (5) и (8).

Передаточные функции по напряжению и по току для линейного провода А однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения определяются по формулам:

$$K_{AU}(j\omega) = \frac{U_{2An}(\cos \varphi_{u2An} - j \sin \varphi_{u2An})}{U_{An}(\cos \varphi_{uAn} - j \sin \varphi_{uAn})},$$

$$K_{AI}(j\omega) = \frac{I_{2An}(\cos \varphi_{i2An} - j \sin \varphi_{i2An})}{I_{An}(\cos \varphi_{iAn} - j \sin \varphi_{iAn})}.$$

где $U_{2A}(j\omega)$ и $I_{2A}(j\omega)$ – спектральные плотности выходных напряжения фазы А и тока в линии А того же участка ЛЭП.

Передаточные функции для других линейных проводов однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения формируются аналогично.

Сформированные таким образом передаточные функции исследуемого объекта по току и напряжению позволяют построить частотные характеристики передачи электрической энергии по анализируемому участку трехпроводной ЛЭП (рис. 3, 4).

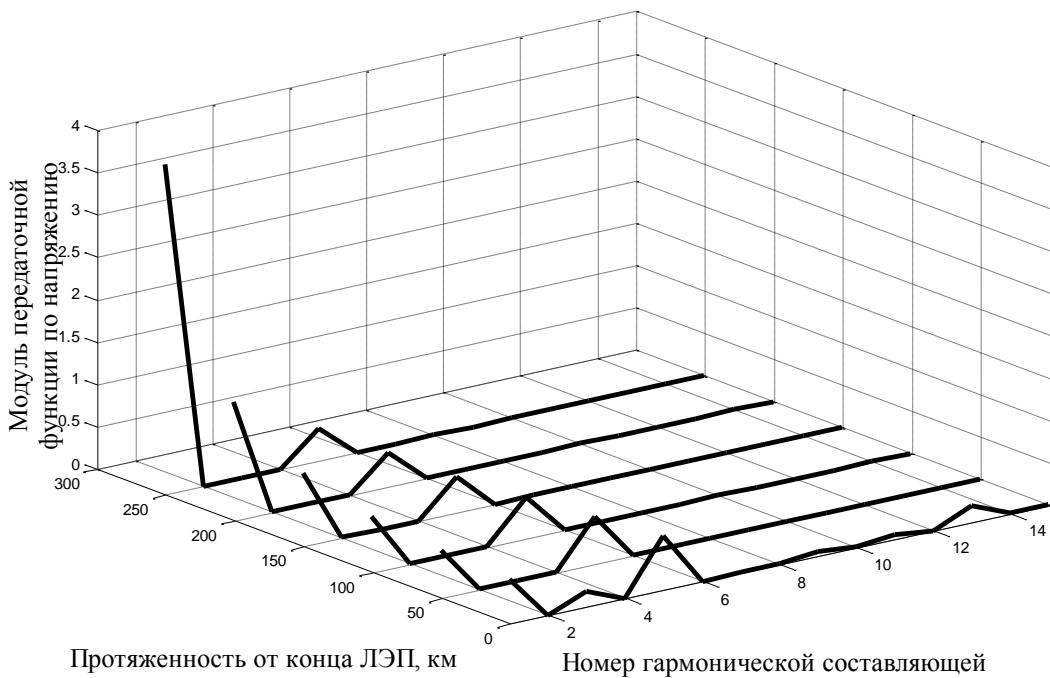


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики (АХЧ) однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения по напряжению

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristics of the homogeneous section of the three-phase three-wire transmission line for voltage

По этим характеристикам видно, что высшие гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, расположенной в конце анализируемого однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения, быстро затухают.

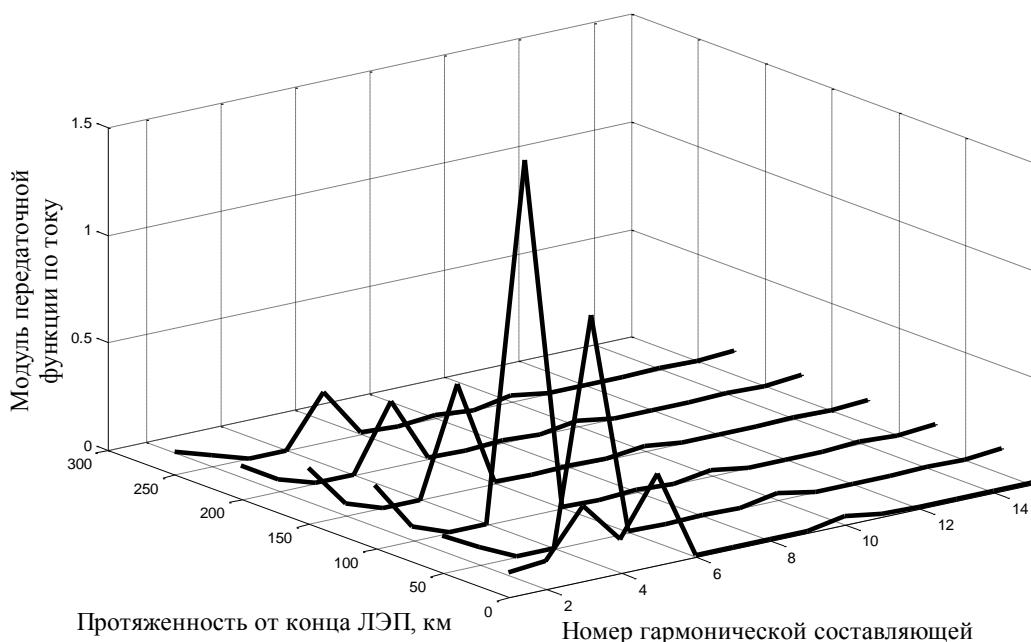


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики (АХЧ) однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения по току

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of the homogeneous section of the three-phase three-wire transmission line for current



Заключение

По приведенным здесь результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Передача электрической энергии по ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте каждой гармонической составляющей обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля. Причем все три пары волн электромагнитного поля присутствуют в каждом линейном проводе линии электропередачи, каждая из которых имеет составляющие, иллюстрирующие электромагнитную связь всех токоведущих частей ЛЭП.

2. Скорость передачи электрической энергии по каждому линейному проводу определяется фазовой скоростью результирующей волны электромагнитного поля. Она гораздо меньше скорости распространения магнитного поля в вакууме.

3. Процесс передачи электрической энергии носит сложный колебательный характер.

4. Длина результирующей волны электромагнитного поля в каждом линейном проводе ЛЭП определяется первичными параметрами анализируемой линии электропередачи.

Библиографический список

1. Якушев А.Я., Середа А.Г., Василенко М.Н., Булавский П.Е., Белозеров В.Л. Анализ электромагнитных процессов в однородной длинной линии // Электротехника. 2017. № 10. С. 23–28.
2. Большанин Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнения. Братск: Изд-во Братского гос. ун-та, 2016. 313 с.
3. Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. Математическая модель электромагнитного поля провода многоцепной воздушной линии электропередачи в установившемся режиме // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия: Технические науки. 2013. № 4 (36). С. 150–154.
4. Костенко М.В., Перельман А.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272с.
5. Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4 (33). С. 35–40.
6. Панова Е.А., Савельева К.С. Определение удельных электрических параметров воздушных линий электропередачи // Электрооборудование, эксплуатация и ремонт. 2014. № 10. С. 16–22.
7. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушной линии электропередачи 330–500кВ; 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергия, 1974. 472 с.
8. Костенко М.В. Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // Электричество. 1955. № 10. С. 29–44.
9. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Косвенное измерение укрупненных первичных параметров двухпроводной линии электропередачи // Измерительная техника. 2016. № 5. С. 50–52.
10. Fereira V.H., Zanghi R., Fortez M.Z., Sotelo G.G., Silva R.B.M., Souza J.C.S., Guimarães C.H.C., Gomes S.Jr. A survey on intelligent system transmission lines // Electric Power System Research. 2016. No. 136. P. 135–153.
11. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Indirect Measurement of Aggregate Primary Parameters Of a Two-Wire Transmission Line // Measurement Techniques. August 2016. Vol. 59. Issue 5. P. 521–525.
12. Пат. № 2210154, Российская Федерация, МКИ Н 02 J 3/01. Способ прогнозирования гармонических составляющих электрической энергии по неразветвленным участкам электроэнергетической системы / Большанин Г.А. № 2001106402; заявл. 06.03.01; опубл. 10.08.03.
13. Большанин Г.А. Математическое моделирование распределения электрической энергии низкого качества в трехфазной четырехпроводной электроэнергетической системе // Математика в вузе: труды Междунар. науч.-метод. конф. (г. Санкт-Петербург, сентябрь 2004 г.). Санкт-Петербург, 2004. С. 117–119.
14. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г., Харин С.И. Применение теоремы о многополюсниках для анализа распределения электрической энергии пониженного качества по ЛЭП. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири // Материалы Межрегиональной научно-технической конференции (Братск, 2007 г.). Братск, 2007. С. 24–25.

References

1. Yakushev A.Ya., Sereda A.G., Vasilenko M.N., Bulavskij P.E., Belozerov V.L. Analysis of electromagnetic processes in a homogeneous long line. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering], 2017, no. 10, pp. 23–28. (In Russian)
2. Bol'shanin G.A. *Peredacha elektricheskoy energii po LEP odno-, dvuh- i trekhpro-vodnogo ispolneniya* [Transmission of



- electric energy by one-, two - and three-wire power lines]. Bratsk: Bratsk State University Publ., 2016, 313 p. (In Russian)
3. Vedernikov A.S., Gol'dshtejn V.G., Shishkov E.M. Mathematical model of electromagnetic field of the multicircuit overhead power line wire operating at stationary mode. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2013, no. 4 (36), pp. 150–154. (In Russian)
4. Kostenko M.V., Perel'man A.S., Shkarin Yu.P. *Volnovye processy i elektricheskie pomekhi v mnogoprivodnyh liniyah vysokogo napryazheniya* [Wave processes and electrical interference in multi-wire high-voltage lines]. Moscow: Energiya Publ., 1973, 272 p. (In Russian)
5. Panova E.A., Al'brekht A.Ya. Specified Per-Unit Parameters of Double Circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4 (33), pp. 35–40. (In Russian)
6. Panova E.A., Savel'eva K.S. Determination of specific electrical parameters of overhead transmission lines. *Elektrooborudovanie, ekspluataciya i remont* [Electrical Equipment, Operation and Repair], 2014, no. 10, pp. 16–22. (In Russian)
7. Mel'nikov N.A., Rokotyan S.S., Sherencis A.N. *Proektirovanie elektricheskoy chasti vozdushnoj linii elektroperekhodach 330–500kV* [Design of an electrical part of the 330–500kV overhead transmission line]. Moscow: Energiya Publ., 1974, 472 p. (In Russian)
8. Kostenko M.V. Mutual resistances between air lines taking into account the surface effect in the ground. *Elektrичество* [Electricity], 1955, no. 10, pp. 29–44. (In Russian)
9. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Indirect Measurement of Aggregate Primary Parameters of a Two-Wire Transmission Line. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2016, no. 5, pp. 50–52. (In Russian)
10. Fereira V.H., Zanghi R., Fortez M.Z., Sotelo G.G., Silva R.B.M., Souza J.C.S., Guimarães C.H.C., Gomes S.Jr. A survey on intelligent system transmission lines. *Elec-tric Power System Research*, 2016, no. 136, pp. 135–153.
11. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Indirect Measurement of Aggre-gate Primary Parameters Of a Two-Wire Transmission Line. *Measurement Techniques*. August 2016, vol. 59, Issue 5, pp. 521–525.
12. Bol'shanin G.A. *Sposob prognozirovaniya garmonicheskikh sostavlyayushchih elektricheskoy energii po nerazvetylennym uchastкам elektroenergeticheskoy sistemy* [Method to predict harmonic components of electrical energy on power system single-path sections]. Patent RF, no. 2210154, 2003.
13. Bol'shanin G.A. *Matematicheskoe modelirovaniye raspredeleniya elektricheskoy energii nizkogo kachestva v trekhfaznoj chetyrekhprivodnoj elektroenergeticheskoy sisteme* [Mathematical modeling of the low-quality electric energy distribution in a three-phase four-wire electric power system]. *Trudy mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii "Matematika v vuze"* [Proceedings of the International scientific and methodical conference "Mathematics in Higher School" St. Petersburg, September 2004]. Saint-Petersburg, 2004, pp. 117–119. (In Russian)
14. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G., Harin S.I. *Primenenie teoremy o mnogopolyusnikah dlya analiza raspredeleniya elektricheskoy energii ponizhennogo kachestva po LEP. Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri* [Application of the theorem on multipoles to analyze low quality electric energy distribution in transmission lines. Natural and engineering sciences for Siberian regions development]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Materials of the Interregional Scientific and Technical Conference, Bratsk, 2007]. Bratsk, 2007, pp. 24–25. (In Russian)

Критерий авторства

Большанин Г.А. предложил методику прогнозирования распределения гармонических составляющих напряжений и токов в линиях электропередачи трехпроводного исполнения, подготовил рукопись и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bolshanin G.A. proposed the methods of predicting the voltage and current harmonic component distribution in three-wire power lines, prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Большанин Георгий Анатольевич, доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электротехники, e-mail: bolshaning@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Georgy A. Bolshanin, Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, e-mail: bolshaning@mail.ru