

Расчет постоянных интегрирования при передаче электрической энергии потребителю*

Г.А. БОЛЬШАНИН

665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: bolshaning@mail.ru

Рассматриваются особенности распространения электромагнитного поля в линейной среде. Электрическая энергия по проводам линий электропередачи (ЛЭП) распространяется по гармоническим законам. Передача электрической энергии по ЛЭП трехпроводного исполнения обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля: тремя падающими и тремя отраженными. Представлена схема распределения амплитудных значений первой пары падающих и отраженных волн электромагнитного поля по линейному проводу однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения. Показано, что в каждом линейном проводе однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения от каждой пары волн электромагнитного поля присутствует одна падающая и одна отраженная собственные волны электромагнитного поля, а также две падающие и две отраженные наведенные от соседних проводов волны электромагнитного поля. Отмечено, что амплитудные значения волн электромагнитного поля определяются постоянными интегрирования. Сведения о постоянных интегрирования необходимы и для прогнозирования напряжений и токов на отдельных участках ЛЭП. Известна методика определения их численных значений, но в ней не учитывается электромагнитная связь между проводами линии электропередачи, а потому она пригодна лишь для участков ЛЭП бесконечно малой протяженности. Предлагается методика определения численных значений постоянных интегрирования с учетом всех электромагнитных связей между токоведущими частями ЛЭП. Для использования этой методики необходимо иметь достоверные сведения о первичных параметрах анализируемого однородного участка ЛЭП и о напряжениях и токах в начале или в конце этого участка. Приведены графические интерпретации распределения фазного напряжения и линейного тока вдоль однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения. Показано, что в материальной среде, каковыми являются провода ЛЭП, длина волны электромагнитного поля зависит от величины коэффициента фазы и оказывается меньше длины волны электромагнитного поля в вакууме (6000 км).

Ключевые слова: падающие и отраженные волны электромагнитного поля, фазные напряжения, линейные токи, постоянная распространения, линия электропередачи, однородный участок, гармоническая составляющая, длина волны

* Статья получена 27 октября 2017 г.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 7.559.2011, государственный регистрационный номер НИР 01201255056.

ВВЕДЕНИЕ

Потребителям большой мощности электрическая энергия доставляется, как правило, воздушными линиями электропередачи (ЛЭП) трехфазного трехпроводного исполнения напряжением выше 35 кВ. Методика прогнозирования напряжений и токов на линиях протяженностью менее 200...300 км широко известна и успешно применяется в инженерной практике [1]. Здесь ЛЭП рассматриваются в качестве линий с сосредоточенными параметрами [2]. Традиционно расчет многопроводных ЛЭП ведется для одного линейного провода анализируемой линии электропередачи. Впоследствии результаты расчета, как правило, распространяются на остальные линейные провода [3, 4].

ЛЭП напряжением свыше 220 кВ обычно имеют протяженность более 200...300 км. Распределение электрической энергии по таким линиям объективно не может быть описано линейными законами, и потому такие линии принято представлять линиями с распределенными параметрами. В теории электротехники существует учение о линиях с распределенными параметрами [1, 3], из которого следует, что передача электрической энергии по однопроводной линии обеспечивается одной парой волн электромагнитного поля: одной падающей и одной отраженной [5].

Исследования М.В. Костенко, Л.С. Перельмана и Ю.П. Шкарина показали, что передача электрической энергии по многопроводным ЛЭП обеспечивается многими парами волн электромагнитного поля [6, 7]. Это положение впоследствии было подтверждено в работах [3, 8–12] и еще раз отмечено, что электрическая энергия по трехпроводным ЛЭП обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля, по четырехпроводной – четырьмя и т. д. Доказано, что качественные и количественные характеристики передачи электрической энергии по однопроводной ЛЭП и трехпроводной ЛЭП различны [11].

Законы распределения напряжений и токов по трехпроводным линиям электропередачи в условиях пониженного качества электрической энергии представлены в работе [9]. Здесь учтена электромагнитная связь между линейными проводами, а также между линейными проводами и заземленными конструктивными элементами ЛЭП. В законах распределения токов вдоль ЛЭП прослеживается влияние линейных проводов друг на друга. Но, к сожалению, такого влияния не наблюдается в законах распределения напряжений. То есть эти законы оказываются справедливыми лишь для ЛЭП бесконечно малой протяженности и не годятся для определения численных значений напряжений и токов в линиях электропередачи конечной протяженности. Причина этого недостатка кроется в специфическом способе определения численных значений постоянных интегрирования, присутствующих в законах распределения напряжений и токов вдоль однородного участка ЛЭП в общем виде [9], пригодном лишь для линий бесконечно малой протяженности.

Однако учет всех электромагнитных связей между токоведущими частями ЛЭП при прогнозировании результатов передачи электрической энергии по линиям электропередачи конечной протяженности необходим [10, 13–17]

В представляемой здесь работе предпринята попытка формирования анализа распределения напряжений и токов вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП конечной протяженности. Этот анализ основан на методах математического моделирования.

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЮ

Передача электрической энергии потребителю по однородному участку трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения потребителю обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля. 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. Получается, что в передаче электрической энергии по каждому линейному проводу участвуют 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 [5, 9–12].

Схема распределения амплитудных значений первой (условно) пары волн электромагнитного поля вдоль линейного провода A однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения протяженностью l_Σ на частоте n -й гармонической составляющей изображена на рис. 1. Каждая пара волн электромагнитного поля присутствует во всех трех линейных проводах. Первая пара волн, как и вторая и третья, в каждом линейном проводе делится на три пары: одна пара собственных и две пары взаимных.

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

$$i_{2An}^{(1)} = i_{2An}^{(1A)} + i_{2An}^{(1B)} + i_{2An}^{(1C)}. \quad (1)$$

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

$$i_{2An}^{(2)} = i_{2An}^{(2A)} + i_{2An}^{(2B)} + i_{2An}^{(2C)},$$

$$i_{2An}^{(3)} = i_{2An}^{(3A)} + i_{2An}^{(3B)} + i_{2An}^{(3C)}.$$

Вся электрическая энергия, передаваемая по линейному проводу A потребителю, определяется суммой

$$i_{2An} = \frac{1}{3} (i_{2An}^{(1)} + i_{2An}^{(2)} + i_{2An}^{(3)}).$$

Слагаемые в уравнении (1), судя по схеме распределения амплитудных значений волн электромагнитного поля, изображенной на рис. 1, определяются так:

$$i_{2An}^{(1A)} = \frac{A_{A2n}}{Z_{cA1n}} e^{-\gamma_{1n} l_\Sigma} - \frac{A_{A1n}}{Z_{cA1n}} e^{\gamma_{1n} l_\Sigma},$$

$$i_{2An}^{(1B)} = \frac{A_{B2n}}{Z_{cAB1n}} e^{-\gamma_{1n} l_{\Sigma}} - \frac{A_{B1n}}{Z_{cAB1n}} e^{\gamma_{1n} l_{\Sigma}},$$

$$i_{2An}^{(1C)} = \frac{A_{C2n}}{Z_{cCA1n}} e^{-\gamma_{1n} l_{\Sigma}} - \frac{A_{C1n}}{Z_{cCA1n}} e^{\gamma_{1n} l_{\Sigma}}.$$

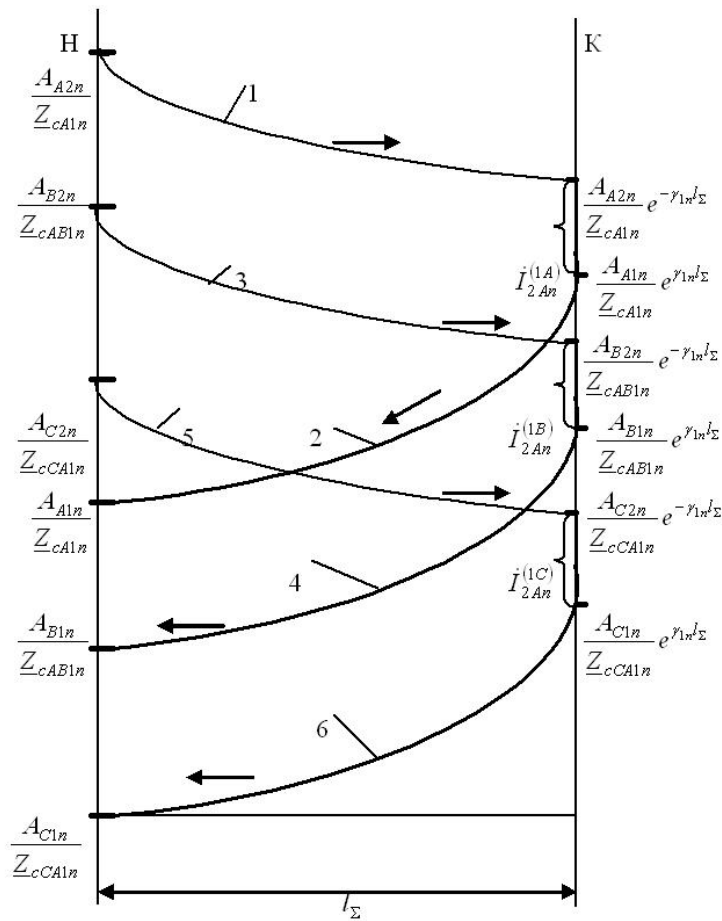


Рис. 1. Схема распределения амплитудных значений первой пары падающих и отраженных волн электромагнитного поля по линейному проводу A однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения:

1 – собственная падающая волна; 2 – собственная отраженная волна; 3 – наведенная падающая волна от линейного провода B ; 4 – наведенная отраженная волна от линейного провода B ; 5 – наведенная падающая волна от линейного провода C ; 6 – наведенная отраженная волна от линейного провода C

Величина тока в линии A от первой пары волн электромагнитного поля, передаваемая потребителю, перефразируя уравнение (1), определяется так:

$$\begin{aligned} i_{2An}^{(1)} = & \frac{A_{A2n}}{\underline{Z}_{cA1n}} e^{-\gamma_{1n}l\Sigma} - \frac{A_{A1n}}{\underline{Z}_{cA1n}} e^{\gamma_{1n}l\Sigma} + \frac{A_{B2n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} e^{-\gamma_{1n}l\Sigma} - \frac{A_{B1n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} e^{\gamma_{1n}l\Sigma} + \\ & + \frac{A_{C2n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} e^{-\gamma_{1n}l\Sigma} - \frac{A_{C1n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} e^{\gamma_{1n}l\Sigma}. \end{aligned}$$

По аналогии определяются величины токов в линии A от второй и третьей волн электромагнитного поля. Весь ток, передаваемый потребителю по линейному проводу A , в таком случае определится так:

$$\begin{aligned} i_{2An} = & \frac{1}{3} \left[\left(\frac{A_{A2n}}{\underline{Z}_{cA1n}} + \frac{A_{B2n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} + \frac{A_{C2n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} \right) e^{-\gamma_{1n}l\Sigma} - \right. \\ & - \left(\frac{A_{A1n}}{\underline{Z}_{cA1n}} + \frac{A_{B1n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} + \frac{A_{C1n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} \right) e^{\gamma_{1n}l\Sigma} + \\ & + \left(\frac{A_{A4n}}{\underline{Z}_{cA2n}} + \frac{A_{B4n}}{\underline{Z}_{cAB2n}} + \frac{A_{C4n}}{\underline{Z}_{cCA2n}} \right) e^{-\gamma_{2n}l\Sigma} - \\ & - \left(\frac{A_{A3n}}{\underline{Z}_{cA2n}} + \frac{A_{B3n}}{\underline{Z}_{cAB2n}} + \frac{A_{C3n}}{\underline{Z}_{cCA2n}} \right) e^{\gamma_{2n}l\Sigma} + \\ & + \left(\frac{A_{A6n}}{\underline{Z}_{cA3n}} + \frac{A_{B6n}}{\underline{Z}_{cAB3n}} + \frac{A_{C6n}}{\underline{Z}_{cCA3n}} \right) e^{-\gamma_{3n}l\Sigma} - \\ & \left. - \left(\frac{A_{A5n}}{\underline{Z}_{cA3n}} + \frac{A_{B5n}}{\underline{Z}_{cAB3n}} + \frac{A_{C5n}}{\underline{Z}_{cCA3n}} \right) e^{\gamma_{3n}l\Sigma} \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

Подобным образом определяются и токи, передаваемые потребителю по линейным проводам i_{2Bn} и i_{2Cn} .

Схема распределения амплитудных значений волн электромагнитного поля по линейному проводу однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения, изображенная на рис. 1, позволяет составить уравнения для определения действующих значений линейных токов в начале анализируемого участка линии электропередачи:

$$i_{1An} = \frac{1}{3} \left(\frac{A_{A2n} - A_{A1n}}{\underline{Z}_{cA1n}} + \frac{A_{A4n} - A_{A3n}}{\underline{Z}_{cA2n}} + \frac{A_{A6n} - A_{A5n}}{\underline{Z}_{cA3n}} + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{A_{B2n} - A_{B1n}}{Z_{cAB1n}} + \frac{A_{B4n} - A_{B3n}}{Z_{cAB2n}} + \frac{A_{B6n} - A_{B5n}}{Z_{cAB3n}} + \\
& + \frac{A_{C2n} - A_{C1n}}{Z_{cCA1n}} + \frac{A_{C4n} - A_{C3n}}{Z_{cCA2n}} + \frac{A_{C6n} - A_{C5n}}{Z_{cCA3n}} \Big).
\end{aligned}$$

Аналогично формируются уравнения для линейных токов в начале линейных проводов B и C .

Общий вид уравнения распределения фазного напряжения вдоль линейного провода A [5, 6]:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{An} = \frac{1}{3} \Big(& A_{A1n} e^{\gamma_{1n} l} + A_{A2n} e^{-\gamma_{1n} l} + A_{A3n} e^{\gamma_{2n} l} + \\
& + A_{A4n} e^{-\gamma_{2n} l} + A_{A5n} e^{\gamma_{3n} l} + A_{A6n} e^{-\gamma_{3n} l} \Big). \quad (3)
\end{aligned}$$

При формировании уравнений для определения численных значений постоянных интегрирования следует использовать уравнения распределения напряжений типа (3). Например, напряжение фазы A вдоль линейного провода A однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения при нулевой протяженности этого участка ($l = 0$)

$$\dot{U}_{1An} = \frac{1}{3} (A_{A1n} + A_{A2n} + A_{A3n} + A_{A4n} + A_{A5n} + A_{A6n}). \quad (4)$$

Неизвестными в данном случае следует считать шесть постоянных интегрирования A_{A1n} , A_{A2n} , A_{A3n} , A_{A4n} , A_{A5n} и A_{A6n} . Для их определения необходимы еще пять дополнительных уравнений.

Первая производная уравнения (4) по переменной l при $l = 0$ может быть представлена так:

$$\frac{d\dot{U}_{1An}}{dl} = \frac{1}{3} [\gamma_{1n} (A_{A1n} - A_{A2n}) + \gamma_{2n} (A_{A3n} - A_{A4n}) + \gamma_{3n} (A_{A5n} - A_{A6n})] \quad (5)$$

или [9]

$$\frac{d\dot{U}_{1An}}{dl} = -(\dot{I}_{1An} Z_{0An} + \dot{I}_{1Bn} Z_{0ABn} + \dot{I}_{1Cn} Z_{0CAn}), \quad (6)$$

где \dot{I}_{1An} , \dot{I}_{1Bn} и \dot{I}_{1Cn} – действующие значения линейных токов в начале анализируемого участка ЛЭП на частоте n -й гармонической составляющей;

$$Z_{0An} = R_{0An} + jn\omega L_{0An},$$

$$\underline{Z}_{0ABn} = jn\omega M_{0ABn},$$

$$\underline{Z}_{0CAn} = jn\omega M_{0CAn},$$

здесь R_{0An} и L_{0An} – погонные активное сопротивление и собственная индуктивность линейного провода A на частоте n -й гармонической составляющей; M_{0ABn} и M_{0CAn} – погонные взаимные индуктивности между линейными проводами A и B , C и A на частоте n -й гармонической составляющей; ω – циклическая частота.

При совмещении уравнений (5) и (6) получается следующее:

$$\begin{aligned} \gamma_{1n}(A_{A1n} - A_{A2n}) + \gamma_{2n}(A_{A3n} - A_{A4n}) + \gamma_{3n}(A_{A5n} - A_{A6n}) = \\ = -3(\dot{I}_{1An}\underline{Z}_{0An} + \dot{I}_{1Bn}\underline{Z}_{0ABn} + \dot{I}_{1Cn}\underline{Z}_{0CAn}). \end{aligned} \quad (7)$$

Вторая производная уравнения (3) по переменной l при $l = 0$

$$\frac{d^2\dot{U}_{1An}}{dl^2} = \frac{1}{3}[\gamma_{1n}^2(A_{A1n} + A_{A2n}) + \gamma_{2n}^2(A_{A3n} + A_{A4n}) + \gamma_{3n}^2(A_{A5n} + A_{A6n})]. \quad (8)$$

Вторую производную напряжения фазы A по переменной l можно представить в виде уравнения [9]

$$\begin{aligned} \frac{d^2\dot{U}_{1An}}{dl^2} = & (\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0CAn} - \\ & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn})\dot{U}_{1An} - \\ & - (\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0B0n} - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0BCn} - \\ & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0BCn})\dot{U}_{1Bn} - \\ & - (\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0BCn} - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0C0n} - \\ & - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0BCn})\dot{U}_{1Cn}, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\underline{Y}_{0A0n} = G_{0A0n} + jn\omega C_{0A0n},$$

$$\underline{Y}_{0B0n} = G_{0B0n} + jn\omega C_{0B0n},$$

$$\underline{Y}_{0C0n} = G_{0C0n} + jn\omega C_{0C0n},$$

$$\underline{Y}_{0ABn} = G_{0ABn} + jn\omega C_{0ABn},$$

$$\underline{Y}_{0BCn} = G_{0BCn} + jn\omega C_{0BCn},$$

$$\underline{Y}_{0CAn} = G_{0CAn} + jn\omega C_{0CAn},$$

здесь G_{0A0n} , G_{0B0n} , G_{0C0n} и C_{0A0n} , C_{0B0n} , C_{0C0n} – погонные активные проводимости и емкости между линейными проводами и поверхностью земли 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. При объединении уравнений (8) и (9) получается следующее:

$$\begin{aligned} & \gamma_{1n}^2(A_{A1n} + A_{A2n}) + \gamma_{2n}^2(A_{A3n} + A_{A4n}) + \gamma_{3n}^2(A_{A5n} + A_{A6n}) = \\ & = 3(\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0CAn} - \\ & \quad - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn})\dot{U}_{1An} - \\ & - 3(\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0B0n} - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0BCn} - \\ & \quad - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0BCn})\dot{U}_{1Bn} - \\ & - 3(\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0BCn} - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0C0n} - \\ & \quad - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0BCn})\dot{U}_{1Cn}. \end{aligned} \quad (10)$$

Третья производная уравнения (3) по переменной l имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d^3\dot{U}_{An}}{dl^3} = & \frac{1}{3} \left[\gamma_{1n}^3 (A_{A1n}e^{\gamma_{1n}l} - A_{A2n}e^{-\gamma_{1n}l}) + \gamma_{2n}^3 (A_{A3n}e^{\gamma_{2n}l} - A_{A4n}e^{-\gamma_{2n}l}) + \right. \\ & \left. + \gamma_{3n}^3 (A_{A5n}e^{\gamma_{3n}l} - A_{A6n}e^{-\gamma_{3n}l}) \right]. \end{aligned}$$

При $l = 0$ это уравнение переписывается так:

$$\frac{d^3\dot{U}_{1An}}{dl^3} = \frac{1}{3} \left[\gamma_{1n}^3 (A_{A1n} - A_{A2n}) + \gamma_{2n}^3 (A_{A3n} - A_{A4n}) + \gamma_{3n}^3 (A_{A5n} - A_{A6n}) \right]. \quad (11)$$

Третью производную напряжения фазы A в начале анализируемого участка ЛЭП по переменной l можно представить и в ином виде:

$$\begin{aligned} \frac{d^3 \dot{U}_{1An}}{dl^3} = & (\underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0A0n} + \underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0CAn} - \\ & - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0CAn}) \frac{d \dot{U}_{1An}}{dl} - \\ & - (\underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0B0n} - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0BCn} - \\ & - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0BCn}) \frac{d \dot{U}_{1Bn}}{dl} - \\ & - (\underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0BCn} - \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0C0n} - \\ & - \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0BCn}) \frac{d \dot{U}_{1Cn}}{dl}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d^3 \dot{U}_{1An}}{dl^3} = & -(\underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0A0n} + \underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0CAn} - \\ & - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0CAn}) (\dot{I}_{1An} \underline{Z}_{0An} + \dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{0ABn} + \dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{0CAn}) + \\ & + (\underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0B0n} - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0BCn} - \\ & - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0BCn}) (\dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{0Bn} + \dot{I}_{1An} \underline{Z}_{0ABn} + \dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{0BCn}) + \\ & + (\underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0BCn} - \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0C0n} - \\ & - \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0BCn}) (\dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{0Cn} + \dot{I}_{1An} \underline{Z}_{0CAn} + \dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{0BCn}). \quad (12) \end{aligned}$$

При объединении уравнений (11) и (12) получается следующее:

$$\begin{aligned} \gamma_{1n}^3 (A_{A1n} - A_{A2n}) + \gamma_{2n}^3 (A_{A3n} - A_{A4n}) + \gamma_{3n}^3 (A_{A5n} - A_{A6n}) = \\ = -3(\underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0A0n} + \underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0CAn} - \\ - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0CAn} \underline{Y}_{0CAn}) (\dot{I}_{An} \underline{Z}_{0An} + \dot{I}_{Bn} \underline{Z}_{0ABn} + \dot{I}_{Cn} \underline{Z}_{0CAn}) + \\ + 3(\underline{Z}_{0An} \underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0B0n} - \underline{Z}_{0ABn} \underline{Y}_{0BCn} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -Z_{0ABn}Y_{0ABn} + Z_{0CAn}Y_{0BCn})(i_{Bn}Z_{0Bn} + i_{An}Z_{0ABn} + i_{Cn}Z_{0BCn}) + \\
& + 3(Z_{0An}Y_{0CAn} + Z_{0ABn}Y_{0BCn} - Z_{0CAn}Y_{0C0n} - \\
& - Z_{0CAn}Y_{0CAn} - Z_{0CAn}Y_{0BCn})(i_{Cn}Z_{0Cn} + i_{An}Z_{0CAn} + i_{Bn}Z_{0BCn}). \quad (13)
\end{aligned}$$

Аналогично производятся расчеты 4-й и 5-й производной уравнения (3) по переменной l .

Совместное решение уравнений (3), (7), (10), (13) и результатов от решения по 4-й и 5-й производной уравнения (3) интегрирования позволит определить численные значения постоянных интегрирования A_{A1n} , A_{A2n} , A_{A3n} , A_{A4n} , A_{A5n} и A_{A6n} . Это постоянные интегрирования для линии A . Численные значения постоянных интегрирования для других линий могут быть определены подобным образом. С помощью пакета прикладных программ MATLAB совместное решение этих уравнений можно выполнить в символьном виде и получить формулы для вычисления постоянных интегрирования. Для этого достаточно воспользоваться оператором «solve». Это очень громоздкие формулы. Но тем не менее эти действия позволят определить численные значения постоянных интегрирования. Аналогичные расчеты можно провести и для конца линии. А затем, используя уравнения (2) и (3), выполнить прогноз величин напряжений и токов в любом месте на однородном участке трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения, отстающем от его начала на расстояние l .

Аналогичные расчеты можно провести для конца линии и выполнить прогнозирование напряжений и токов в любом месте однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения, отстающего от его конца на расстояние u [10].

На рис. 2, 3 представлены графические интерпретации распределения напряжения фазы A основной гармонической составляющей и линейного тока вдоль однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения 220 кВ протяженностью 300 км. Его первичные параметры на частоте основной гармонической составляющей:

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

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

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

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

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

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 выполненном исследовании им были присвоены нулевые значения. Это свидетельствует о том, что затухание каждой волны электромагнитного поля практически отсутствует. Но, судя по рис. 2 и 3, фазное напряжение и линейный ток, распространяясь от начала анализируемого участка к его концу, уменьшается, затухает. Этот факт свидетельствует о том, что результирующая волна электромагнитного поля, получившаяся из результата сложения шести волн электромагнитного поля с нулевым затуханием, все-таки затухает. Это не правило. Это лишь частный, но вполне возможный случай.

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 (рис. 2 и 3).

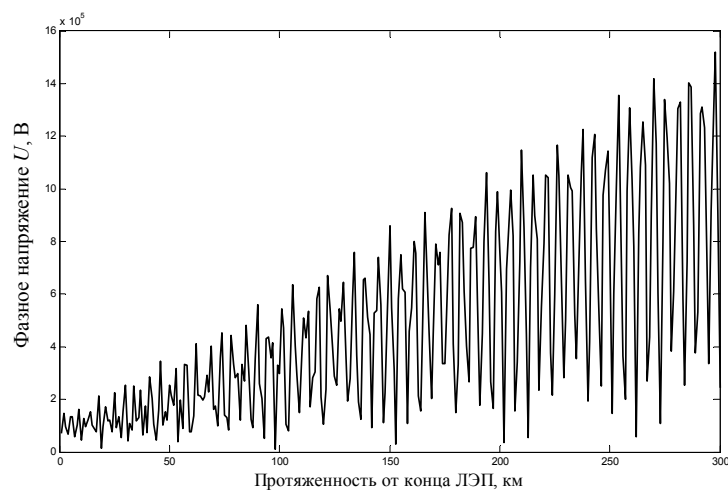


Рис. 2. Графическая интерпретация распределения фазного напряжения от конца однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте основной гармонической составляющей

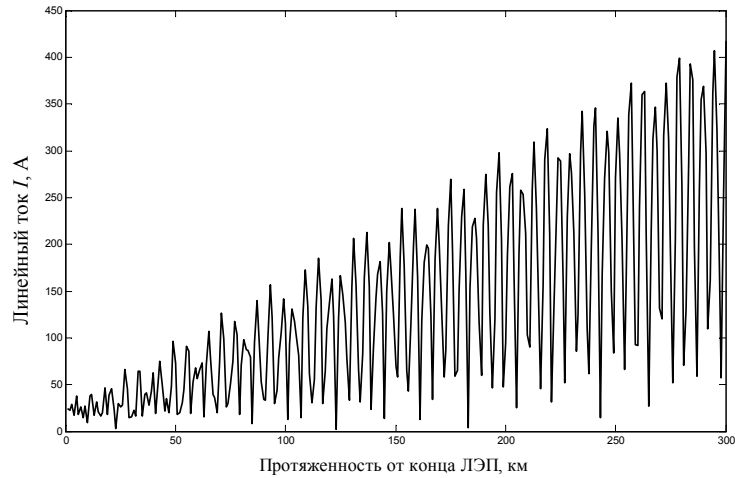


Рис. 3. Графическая интерпретация распределения линейного тока от конца однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте основной гармонической составляющей

Фазовая скорость тока падающей (отраженной) результирующей волны электромагнитного поля даже на частоте основной гармонической составляющей сравнительно мала [18]:

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

где $\alpha = \sqrt[3]{\text{Im}(\gamma_{1n}) \cdot \text{Im}(\gamma_{2n}) \cdot \text{Im}(\gamma_{3n})} = \sqrt[3]{10 \cdot 1 \cdot 10} = 4,64 \text{ км}^{-1}$ – 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 определяем по формуле

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

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. Ее можно определить и визуально по рис. 2 и 3 с достаточной для инженерных расчетов достоверностью. Для достижения желаемой достоверности следует рассмотреть однородный участок анализируемой ЛЭП меньшей протяженности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена исследованию распределения основных характеристик электрической энергии, а значит, волн электромагнитного поля. Здесь рассмотрено распределение волн электромагнитного поля по однородному участку трехпроводного исполнения конечной протяженности. В результате выполненного исследования подтверждено, что передача электрической энергии обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля. Представлена схема распределения этих волн вдоль линейного провода ЛЭП. Показано, что характер распределения электрической энергии зависят от первичных параметров линии электропередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 964 с.
2. Gouda O.E., El-Dein A.Z., El-Gabalawy M.A.H. Effect of electromagnetic field of overhead transmission lines on the metallic gas pipe-lines // Electric Power Systems Research. – 2013. – Vol. 103. – P. 129–136.
3. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 488 с.
4. Гольдштейн В.Г., Ведерников А.С., Шишков Е.М. О необходимости совершенствования программного обеспечения анализа установившихся режимов электрических сетей // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 112–117.
5. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. К вопросу о волновой теории передачи электрической энергии по линиям электропередачи // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 3 (7). – С. 71–76.
6. Костенко М.В., Перельман А.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
7. Перельман Л.С. Уточнение теории распространения волн вдоль длинной многопроводной линии связи с некоторыми техническими вопросами // Известия НИИПТ. – 1963. – № 10. – С. 103–120.
8. Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. Математическая модель электромагнитного поля провода многоцепной воздушной линии электропередачи в установившихся режимах // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 4 (36). – С. 150–154.
9. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем: монография: в 2 кн. – Братск: БрГУ, 2006. – 807 с.
10. Большанин Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнения: монография. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 313 с.
11. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по линии электропередачи: монография. – Братск: Изд-во БрГУ, 2011. – 64 с.
12. Большанин Г.А. Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной линии электропередачи / Г.А. Большанин, Л.Ю. Большанина, Е.Г. Марьясова // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 3 (11). – С. 82–89.
13. Исследование частотных характеристик взаимного влияния воздушных линий электропередачи / В.Н. Селиванов, А.Н. Данилин, О.В. Залесова, В.В. Колобов // Вестник МГТУ. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 744–752.
14. Халилов Ф.Х., Ефимов Б.В. Наведенные напряжения на воздушных линиях электропередачи, отключенных для ремонта. – СПб.: ПЭИПК, 2008. – 52 с.

15. Шишков Е.М., Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г. Влияние несимметрии параметров двухцепной воздушной линии электропередачи на установившиеся режимы // *Электричество*. – 2013. – № 4. – С. 9–18.
16. Взаимовлияние двухцепных воздушных линий и их воздействие на режимы электрических систем / М.Ш. Мисриханов, В.Д. Попов, Н.Н. Якимчук, Р.В. Медов // *Электрические станции*. – 2001. – № 2. – С. 52–58.
17. Influence of neighboring transmission lines on the measurement transmission line UVN options at the operating frequency / S. Wang, W. Hu, G. Zou, Z. Wu, S. Li, Z. Sun // *Dianwang Jishu*. – 2014. – Vol. 38, N 5. – P. 1162–1168.
18. Большанин Г.А., Плотников М.П. Длина волны электромагнитного поля в линиях электропередачи // *Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления*. – 2016. – № 4 (61). – С. 5–11.

Большанин Георгий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетики и электротехники Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – передача электрической энергии по ЛЭП, качество электрической энергии. Имеет более 300 публикаций, в том числе 8 монографий. E-mail: bolshaning@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-115-130

Calculation of integration constants in transmitting electric power to consumers*

G.A. BOLSHANIN

Bratsk State University, 40, Makarenko St., Bratsk, 665709, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: bolshaning@mail.ru

Features of distribution of an electromagnetic field in the linear environment are considered. Electric energy is transmitted along wires of power lines (HVTL) under harmonic laws. Transmission of electric power along the three-wire power line is provided with three couples of electromagnetic field waves: three falling and three reflected waves. A diagram of distribution of amplitude values of the first couple of falling and reflected electromagnetic field waves along the line conductor of a uniform section of the three-phase three-wire power line is provided. It is shown that one falling and one reflected eigenwaves of an electromagnetic field from each couple of electromagnetic field waves is present in each line conductor of a uniform section of the three-wire power line as well as two falling and two reflected waves induced in adjacent wires of an electromagnetic field wave. It is noted that amplitude values of electromagnetic field waves are defined by integration constants. Data on constants of integration are also necessary for the prediction of voltages and currents in separate sections of the power line. The technique of determining their numerical values is known, but electromagnetic communication between power line wires is not considered in it, and therefore it is suitable only for sections of the power line of infinitesimal length. A technique of determining numerical values of constants of integration by accounting all electromagnetic relations between current carrying parts of the power line is proposed. To use this technique it is necessary to have authentic data on primary parameters of an analyzed uniform section of the power line and on voltages and currents at the beginning or at the end of this section. Graphic interpretations of phase voltage and line current distribution along a uniform section of the three-wire power line are given. It is

* Received 27 October 2017.

shown that in the material environment, which power line wires are, the wavelength of an electromagnetic field depends on a phase coefficient value and that it is less than a wavelength of an electromagnetic field in vacuum (6000 km).

Keywords: falling and reflected waves of an electromagnetic field, phase voltage, line currents, propagation constant, propagation constant, power line, uniform section, harmonic component, wavelength

REFERENCES

1. Gerasimov V.G., ed. *Elektrotekhnicheskii spravochnik*. V 4 t. T. 3. *Proizvodstvo, peredacha i raspredelenie elektricheskoi energii* [The electrotechnical reference book. In 4 vol. Vol. 3. Production, transfer and distribution of an electrical energy]. 9th ed. Moscow, MEI Publ., 2004. 964 p.
2. Gouda O.E., El-Dein A.Z., El-Gabalawy M.A.H. Effect of electromagnetic field of overhead transmission lines on the metallic gas pipe-lines. *Electric Power Systems Research*, 2013, vol. 103, pp. 129–136.
3. Ryzhov Yu.P. *Dal'nie elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Distant electricity transmissions of ultrahigh tension]. Moscow, MEI Publ. house, 2007. 488 p.
4. Gol'dshtein V.G., Vedernikov A.S., Shishkov E.M. O neobkhodimosti sovershenstvovaniya programmnoho obespecheniya analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh setei [About need of enhancement of the software of the analysis of the set modes of electrical networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2014, no. 5, pp. 112–117.
5. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu., Mar'yasova E.G. K voprosu o volnovoii teorii peredachi elektricheskoi energii po liniyam elektropredachi [K to a question of the wave theory of transfer of an electrical energy on power lines]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2010, no. 3 (7), pp. 71–76.
6. Kostenko M.V., Perel'man A.S., Shkarin Yu.P. *Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* [Wave processes and electric hindrances in multiwire lines of high voltage]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 272 p.
7. Perel'man L.S. Utochnenie teorii rasprostraneniya voln vdol' dlinnoi mnogoprovodnoi linii svyazi s nekotorymi tekhnicheskimi voprosami [Specification of the theory of distribution of waves along the long multiwire communication line with some technical questions]. *Izvestiya NII postoyanogo toka – NIPT news*, 1963, no. 10, pp. 103–120.
8. Vedernikov A.S., Gol'dshtein V.G., Shishkov E.M. Matematicheskaya model' elektromagnitnogo polya provoda mnogotsepoi vozduшной linii elektropredachi v ustanovivshikhsya rezhimakh [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*, 2012, no. 4 (36), pp. 150–154.
9. Bolshanin G.A. *Raspredelenie elektricheskoi energii ponizhennogo kachestva po uchastkam elektroenergeticheskikh sistem*. V 2 kn. [Distribution of an electrical energy of the lowered quality on sites of electrical power systems. In 2 bk.]. Bratsk, BrGU Publ., 2006. 807 p.
10. Bolshanin G.A. *Peredacha elektricheskoi energii po LEP odno-, dvukh- i trekhprovodnogo is-polneniya* [Transfer of an electrical energy on the power line one - two - and three-wire execution]. Bratsk, BrGU Publ., 2016. 313 p.
11. Bolshanin, G. A. Features of distribution of an electrical energy in the area of an electricity transmission: моногр. / G. A. Bolshanin, L. Yu. Bolshanina. – Bratsk: BRGU publishing house, 2011. – 64 pages.
12. Bolshanin G.A., Bolshanina L.Yu., Mar'yasova E.G. *Osobennosti rasprostraneniya elektricheskoi energii po trekhprovodnoi linii elektropredachi* [Features of distribution of an electrical energy on a three-wire power line]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 3 (11), pp. 82–89.
13. Selivanov V.N., Danilin A.N., Zalesova O.V., Kolobov V.V. *Issledovanie chastotnykh kharakteristik vzaimnogo vliyaniya vozdukhnykh linii elek-tropredachi* [Study of the frequency response

of the mutual coupling between overhead lines]. *Vestnik MGTU – Vestnik MSTU*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 744–752.

14. Khalilov F.Kh., Efimov B.V. *Navedennye napryazheniya na vozdukhnykh liniyakh elektropredachi, otklyuchennykh dlya remonta* [The directed tension on the air-lines of an electricity transmission which are disconnected for repair]. St. Petersburg, PEIPK Publ., 2008. 52 p.

15. Shishkov E.M., Vedernikov A.S., Gol'dshtein V.G. Vliyaniye nesimmetrii parametrov dvukhtsepoi vozdukhnoi linii elektropredachi na ustanovivshiesya rezhimy [Influence of asymmetry of parameters of a two-chain air-line of an electricity transmission on the set modes]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2013, no. 4, pp. 9–18.

16. Misrikhanov M.Sh., Popov V.D., Yakimchuk N.N., Medov R.V. Vzaimovliyaniye dvukhtsepykh vozdukhnykh linii i ikh vozdeistvie na rezhimy elektricheskikh sistem [Interference of two-chain air-lines and their impact on the modes of electrical systems]. *Elektricheskie stantsii – Power Plants*, 2001, no. 2, pp. 52–58.

17. Wang S., Hu W., Zou G., Wu Z., Li S., Sun Z. Influence of neighboring transmission lines on the measurement transmission line UVN options at the operating frequency. *Dianwang Jishu*, 2014, vol. 38, no. 5, pp. 1162–1168.

18. Bolshanin G.A., Plotnikov M.P. Dlina volny elektromagnitnogo polya v liniyakh elektropredachi [The wavelength of the electromagnetic field in the transmission lines]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya. – ESSUTM Bulletin*, 2016, no. 4 (61), pp. 5–11.

Для цитирования:

Большанин Г.А. Расчет постоянных интегрирования при передаче электрической энергии потребителю // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 2 (71). – С. 115–130. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-115-130.

For citation:

Bolshanin G.A. Raschet postoyannykh integrirvaniya pri peredache elektricheskoi energii potrebitelyu [Calculation of integration constants in transmitting electric power to consumers]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 2 (71), pp. 115–130. doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-115-130.