

УДК 621.316.11

Методика прогнозирования напряжений в трехфазной воздушной линии с грозозащитным тросом в условиях пониженного качества электрической энергии*

Г.А. БОЛЬШАНИН¹, М.А. ШЕВЧЕНКО²

¹ 665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет, кандидат технических наук, профессор. E-mail: bolshaning@mail.ru

² 665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет, аспирант. E-mail: shevchenkomix@hotmail.com

Электрическая энергия, передаваемая в настоящее время по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения, характеризуется пониженным качеством. Этот факт усложняет и без того непростую задачу определения напряжения в любой точке исследуемой воздушной линии электропередачи. В работах В.А. Веникова, В.И. Идельчика, А.А. Альмендеева ЛЭП рассматриваются в качестве линий с сосредоточенными параметрами, не учитывается взаимное влияние проводов и грозозащитного троса. Причем при анализе передачи электрической энергии за основу принимаются схемы замещения ЛЭП однопроводного исполнения. Однако в работах Е.М. Шишкова и А.С. Ведерникова упоминается, что неучет грозозащитного троса, использование однопроводных схем замещения, пренебрежение несимметричностью первичных параметров воздушной линии (ВЛ) вносит значительную погрешность в результаты расчета электрических режимов особенно при пониженном качестве электрической энергии. Цель исследования заключается в создании методики прогнозирования напряжений в трехфазной воздушной линии с грозозащитным тросом в условиях пониженного качества электрической энергии. Эта методика основана на волновой теории распределения электрической энергии. Исследуемый участок ЛЭП рассматривается как линия с распределенными параметрами, уравнения распределения фазных напряжений сформированы на основании полнофазной схемы замещения, которая учитывает все электромагнитные связи, включая электромагнитные связи между линейными проводами и грозозащитным тросом. Предлагаемая методика предполагает определение значений постоянных интегрирования с учетом взаимосвязи напряжений и токов соседних проводов. Построены графические интерпретации распределения напряжения вдоль однородного участка ЛЭП трехфазного трехпроводного исполнения с учетом грозозащитного троса на частотах основной и тринадцатой гармонических составляющих. Они позволяют визуально выполнить прогнозирование напряжения на участках ЛЭП различной протяженности, определить длину результирующей волны электрического поля, сформировать передаточные функции для фазных напряжений.

Ключевые слова: напряжение, падающая волна, отраженная волна, постоянные распространения, постоянные интегрирования, математическая модель, качество электрической энергии, несинусоидальность, несимметрия

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-4-163-178

* Статья получена 01 ноября 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

Передача электрической энергии на средние и дальние расстояния чаще всего осуществляется по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП) переменного тока трехпроводного исполнения. Обычно эти линии снабжены грозозащитным проводом, который оказывает существенное влияние на распределение электрической энергии по проводам ЛЭП и в конечном счете на качество передачи электрической энергии потребителям [1].

К сожалению, электрическая энергия в современных электроэнергетических системах отличается пониженным качеством. Это означает, что основные характеристики электрической энергии, каковыми являются напряжения и токи, отличаются от своих нормативных значений: их форма оказывается отличной от синусоидальной, что определяет высокий уровень их несинусоидальности; они неравномерно распределяются по токоведущим частям ЛЭП, что определяет высокий уровень их несимметрии, и т. д. [2, 3].

Неперегруженные линии электропередачи вполне можно считать линейной средой, по которой электрическая энергия распределяется по гармоническим законам. Поэтому для анализа распределения напряжений и токов по токоведущим частям таких ЛЭП применим принцип суперпозиций. На этом основании вполне допустим анализ распределения напряжений и токов по линейным проводам ЛЭП каждой гармонической составляющей этих величин с последующим обобщением полученных таким образом результатов на весь спектр основных характеристик электрической энергии. При этом следует учитывать, что чем больше частота гармонической составляющей напряжения и тока, тем меньше протяженность ЛЭП, где начинает проявляться так называемый «эффект длинных линий». Он заключается в нелинейном распределении напряжения и тока вдоль анализируемой линии электропередачи [5]. Из этого следует, что для гарантированного учета нелинейности распределения напряжения и тока вдоль анализируемой ЛЭП линию электропередачи даже сравнительно небольшой протяженности при анализе распределения напряжений и токов по проводам ЛЭП следует принять за линию с распределенными параметрами [4, 6–8].

Передачу электрической энергии, а именно распределение напряжений и токов по токоведущим частям ЛЭП, целесообразно рассматривать на основании математической модели этого процесса.

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическая модель распределения напряжения и тока на частоте n -й гармонической составляющей по линии электропередачи строится на основании электрической схемы замещения однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом [3, 8–12]. Причем в связи с несимметрией напряжений и токов эта схема замещения должна быть полнофазной [1, 4, 13], как это показано на рис. 1.

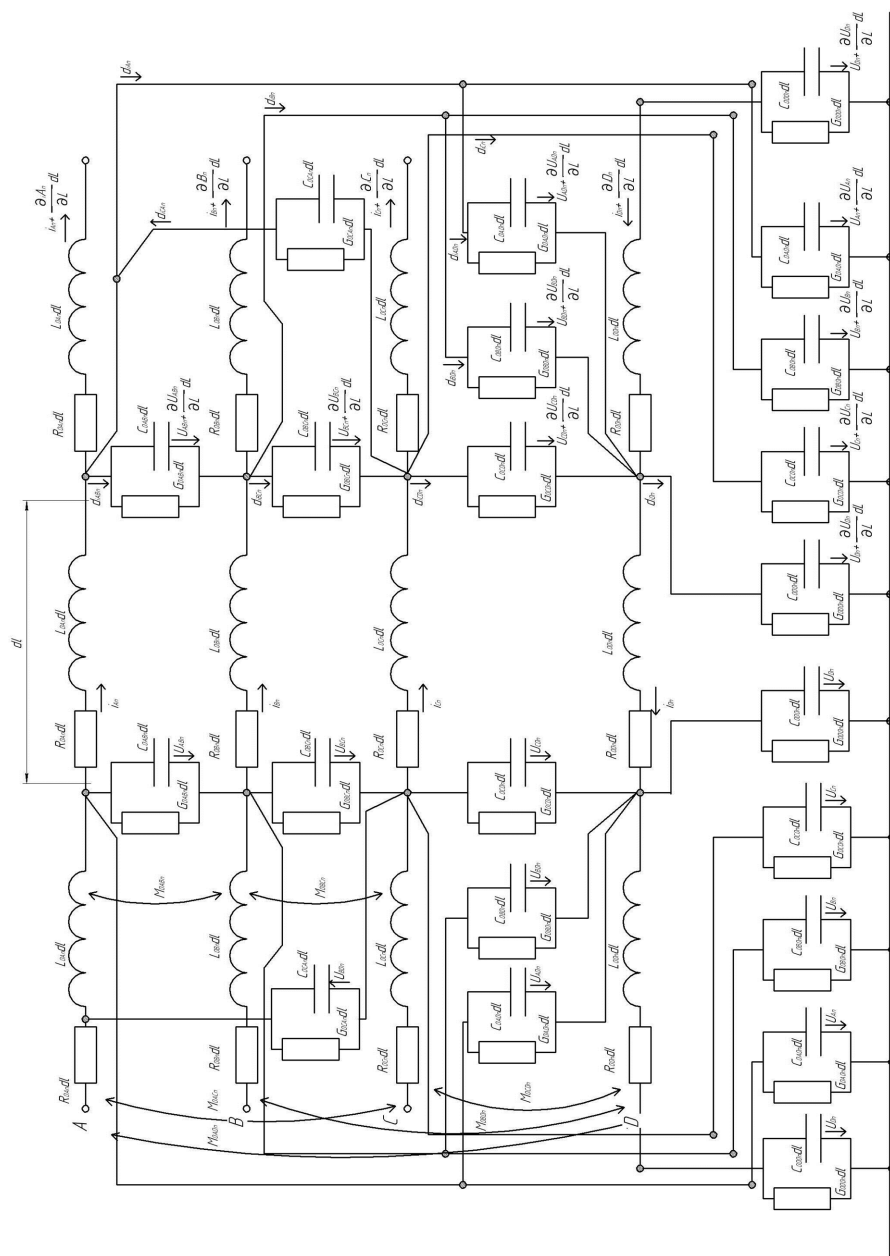


Рис. 1. Электрическая расчетная схема замещения элементарного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом

Математическая модель распределения напряжения и тока по однородному участку ЛЭП трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом представляет собой систему из четырнадцати уравнений [14].

Общий вид совместного решения этих уравнений можно представить так:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} = \frac{1}{4} & \left(\dot{A}_{A1n} e^{\gamma_{1n} l} + \dot{A}_{A2n} e^{-\gamma_{1n} l} + \dot{A}_{A3n} e^{\gamma_{2n} l} + \dot{A}_{A4n} e^{-\gamma_{2n} l} + \right. \\ & \left. + \dot{A}_{A5n} e^{\gamma_{3n} l} + \dot{A}_{A6n} e^{-\gamma_{3n} l} + \dot{A}_{A7n} e^{\gamma_{4n} l} + \dot{A}_{A8n} e^{-\gamma_{4n} l} \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Bn} = \frac{1}{4} & \left(\dot{A}_{B1n} e^{\gamma_{1n} l} + \dot{A}_{B2n} e^{-\gamma_{1n} l} + \dot{A}_{B3n} e^{\gamma_{2n} l} + \dot{A}_{B4n} e^{-\gamma_{2n} l} + \right. \\ & \left. + \dot{A}_{B5n} e^{\gamma_{3n} l} + \dot{A}_{B6n} e^{-\gamma_{3n} l} + \dot{A}_{B7n} e^{\gamma_{4n} l} + \dot{A}_{B8n} e^{-\gamma_{4n} l} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Cn} = \frac{1}{4} & \left(\dot{A}_{C1n} e^{\gamma_{1n} l} + \dot{A}_{C2n} e^{-\gamma_{1n} l} + \dot{A}_{C3n} e^{\gamma_{2n} l} + \dot{A}_{C4n} e^{-\gamma_{2n} l} + \right. \\ & \left. + \dot{A}_{C5n} e^{\gamma_{3n} l} + \dot{A}_{C6n} e^{-\gamma_{3n} l} + \dot{A}_{C7n} e^{\gamma_{4n} l} + \dot{A}_{C8n} e^{-\gamma_{4n} l} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Dn} = \frac{1}{4} & \left(\dot{A}_{D1n} e^{\gamma_{1n} l} + \dot{A}_{D2n} e^{-\gamma_{1n} l} + \dot{A}_{D3n} e^{\gamma_{2n} l} + \dot{A}_{D4n} e^{-\gamma_{2n} l} + \right. \\ & \left. + \dot{A}_{D5n} e^{\gamma_{3n} l} + \dot{A}_{D6n} e^{-\gamma_{3n} l} + \dot{A}_{D7n} e^{\gamma_{4n} l} + \dot{A}_{D8n} e^{-\gamma_{4n} l} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\dot{A}_{A1n}, \dot{A}_{A2n}, \dot{A}_{A3n}, \dot{A}_{A4n}, \dot{A}_{A5n}, \dot{A}_{A6n}, \dot{A}_{A7n}, \dot{A}_{A8n}, \dot{A}_{B1n}, \dot{A}_{B2n}, \dot{A}_{B3n}, \dot{A}_{B4n}, \dot{A}_{B5n}, \dot{A}_{B6n}, \dot{A}_{B7n}, \dot{A}_{B8n}, \dot{A}_{C1n}, \dot{A}_{C2n}, \dot{A}_{C3n}, \dot{A}_{C4n}, \dot{A}_{C5n}, \dot{A}_{C6n}, \dot{A}_{C7n}, \dot{A}_{C8n}, \dot{A}_{D1n}, \dot{A}_{D2n}, \dot{A}_{D3n}, \dot{A}_{D4n}, \dot{A}_{D5n}, \dot{A}_{D6n}, \dot{A}_{D7n}$ и \dot{A}_{D8n} – постоянные интегрирования; $\gamma_{1n}, \gamma_{2n}, \gamma_{3n}, \gamma_{4n}$ – постоянные распространения электромагнитной волны по однородному участку трехфазной трехпроводной воздушной линии с грозозащитным тросом на частоте n -й гармонической составляющей; l – протяженность анализируемого участка ЛЭП.

Из уравнений (1) – (4) видно, что в каждом линейном проводе и в грозозащитном тросе однородного участка анализируемой ЛЭП трехпроводного исполнения присутствует четыре пары волн электромагнитного поля: четыре падающие и четыре отраженные [3, 14]. В уравнениях (1) – (4) постоянные интегрирования $\dot{A}_{A2n}, \dot{A}_{A4n}, \dot{A}_{A6n}, \dot{A}_{A8n}, \dot{A}_{B2n}, \dot{A}_{B4n}, \dot{A}_{B6n}, \dot{A}_{B8n}, \dot{A}_{C2n}, \dot{A}_{C4n}, \dot{A}_{C6n}, \dot{A}_{C8n}, \dot{A}_{D2n}, \dot{A}_{D4n}, \dot{A}_{D6n}$ и \dot{A}_{D8n} характеризуют падающие волны электромагнитного поля, а постоянные интегрирования $\dot{A}_{A1n}, \dot{A}_{A3n},$

$\dot{A}_{A5n}, \dot{A}_{A7n}, \dot{A}_{B1n}, \dot{A}_{B3n}, \dot{A}_{B5n}, \dot{A}_{B7n}, \dot{A}_{C1n}, \dot{A}_{C3n}, \dot{A}_{C5n}, \dot{A}_{C7n}, \dot{A}_{D1n}, \dot{A}_{D3n}, \dot{A}_{D5n}, \dot{A}_{D7n}$ – отраженные волны электромагнитного поля.

Уравнения (1) – (4) позволяют прогнозирование численных значений напряжений в любом месте на однородном участке ЛЭП трехпроводного исполнения, отстающем от его начала на расстоянии l , с учетом грозозащитного провода. Но для этого необходимо иметь достоверные сведения о численных значениях постоянных распространения волн электромагнитного поля и постоянных интегрирования.

Численные значения постоянных распространения волн электромагнитного поля по однородному участку трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом определяются из корней характеристического уравнения системы дифференциальных уравнений второго порядка, которая получается в результате преобразования уравнений, представляющих математическую модель исследуемого процесса. Аналогичная методика применима и для определения численных значений постоянных распространения электромагнитного поля по однородным участкам линий электропередачи с иным количеством токоведущих частей [5, 16].

Методика определения численных значений постоянных интегрирования при распределении напряжений по однородному участку трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом аналогична методике, изложенной в [17].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методики определения постоянных интегрирования для каждого линейного провода однотипны. Поэтому далее есть смысл рассмотреть методику формирования уравнений для определения численных значений постоянных интегрирования лишь для одного линейного провода (например, для линейного провода A). В таком случае интерес представляет уравнение (1), описывающее распределение напряжения вдоль линейного провода фазы A однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения.

Для начала анализируемого участка ЛЭП, когда $l=0$, уравнение (1) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1An} = \frac{1}{4} (A_{A1n} + A_{A2n} + A_{A3n} + A_{A4n} + \\ + A_{A5n} + A_{A6n} + A_{A7n} + A_{A8n}). \end{aligned} \quad (5)$$

Неизвестными в данном случае следует считать восемь постоянных интегрирования $A_{A1n}, A_{A2n}, A_{A3n}, A_{A4n}, A_{A5n}, A_{A6n}, A_{A7n}$ и A_{A8n} . Для их определения необходимы еще семь дополнительных уравнений.

Первая производная уравнения (1) по переменной l при условии $l=0$ имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{U}_{1An}}{dl} = \frac{1}{4} [\gamma_{1n}(A_{A1n} - A_{A2n}) + \gamma_{2n}(A_{A3n} - A_{A4n}) + \\ + \gamma_{3n}(A_{A5n} - A_{A6n}) + \gamma_{4n}(A_{A7n} - A_{A8n})]. \end{aligned}$$

Первую производную напряжения фазы A по переменной l в начале линейного провода A можно представить и так:

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

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

При совмещении двух последних уравнений получается следующее:

$$\begin{aligned} & \gamma_{1n}(A_{A1n} - A_{A2n}) + \gamma_{2n}(A_{A3n} - A_{A4n}) + \\ & + \gamma_{3n}(A_{A5n} - A_{A6n}) + \gamma_{4n}(A_{A7n} - A_{A8n}) = \\ & = -4(\dot{I}_{1An}Z_{0An} + \dot{I}_{1Bn}Z_{0ABn} + \dot{I}_{1Cn}Z_{0CAn} + \dot{I}_{1Dn}Z_{0ADn}). \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения постоянных интегрирования необходимо составить систему из восьми уравнений. Два из них уже есть. Это уравнения (5) и (7). Нужно еще шесть уравнений. Для этого необходимо определить вторую, третью, четвертую, пятую, шестую и седьмую производные уравнений (1) и (6) по переменной l и приравнять эту переменную нулю. В результате этих действий получится следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} & (A_{A1n} + A_{A2n} + A_{A3n} + A_{A4n} + A_{A5n} + A_{A6n} + A_{A7n} + A_{A8n}) \frac{1}{4} = K_1; \\ & \gamma_{1n}A_{A1n} - \gamma_{1n}A_{A2n} + \gamma_{2n}A_{A3n} - \dots - \gamma_{4n}A_{A8n} = -4K_2; \\ & \gamma_{1n}^2A_{A1n} + \gamma_{1n}^2A_{A2n} + \gamma_{2n}^2A_{A3n} + \dots + \gamma_{4n}^2A_{A8n} = 4K_3; \\ & \gamma_{1n}^3A_{A1n} - \gamma_{1n}^3A_{A2n} + \gamma_{2n}^3A_{A3n} - \dots - \gamma_{4n}^3A_{A8n} = -4K_4; \\ & \gamma_{1n}^4A_{A1n} + \gamma_{1n}^4A_{A2n} + \gamma_{2n}^4A_{A3n} + \dots + \gamma_{4n}^4A_{A8n} = 4K_5; \\ & \gamma_{1n}^5A_{A1n} - \gamma_{1n}^5A_{A2n} + \gamma_{2n}^5A_{A3n} - \dots - \gamma_{4n}^5A_{A8n} = -4K_6; \\ & \gamma_{1n}^6A_{A1n} + \gamma_{1n}^6A_{A2n} + \gamma_{2n}^6A_{A3n} + \dots + \gamma_{4n}^6A_{A8n} = 4K_7; \\ & \gamma_{1n}^7A_{A1n} - \gamma_{1n}^7A_{A2n} + \gamma_{2n}^7A_{A3n} - \dots - \gamma_{4n}^7A_{A8n} = -4K_8, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8$ – коэффициенты, зависящие от первичных параметров рассматриваемого участка ЛЭП, напряжений и токов в его начале [18].

Расчет постоянных интегрирования является сравнительно громоздкой задачей, но применение высокоуровневых средств программирования существенно ее упрощает. Так, с помощью программного обеспечения Wolfram-Mathematica, воспользовавшись оператором solve и выполнив совместное решение системы уравнений в символьном виде, можно получить уравнения

для вычисления постоянных интегрирования. Затем, используя полученные численные значения постоянных распространения волн электромагнитного поля и численные значения постоянных интегрирования, с помощью уравнения (1) можно выполнить прогнозирование величин напряжения в проводе фазы A исследуемой ЛЭП в любом месте на однородном участке трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом, отстающим от его начала на расстояние l .

Описанная методика прогнозирования применима в том случае, если известны напряжения и токи в начале рассматриваемого участка трехпроводной ЛЭП. Причем уравнения, которые используются для определения численных значений постоянных интегрирования, применяются на основании допущения, что взаимосвязь напряжений и токов в начале рассматриваемого участка ЛЭП уже обусловлена первичными параметрами этого участка. Это, конечно, допущение [18].

Взаимосвязь напряжений и токов действительно обусловлена первичными параметрами ЛЭП, если протяженность этого участка отлична от нулевого значения. И чем больше протяженность этого участка, тем больше влияние его первичных параметров на взаимосвязь напряжений и токов. Следовательно, ее наибольшее проявление может быть заметно на конце анализируемого участка трехпроводной ЛЭП.

Если же будут известны фазные напряжения и линейные токи на частоте n -й гармонической составляющей в конце анализируемого однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения, то методика прогнозирования напряжения на однородном участке трехфазной ЛЭП несколько изменится.

Напряжение в конце анализируемого участка для линейного провода фазы A при условии $l = l_\Sigma$ определится следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} = \frac{1}{4} & \left(A_{A1n} e^{\gamma_{1n} l_\Sigma} + A_{A2n} e^{-\gamma_{1n} l_\Sigma} + A_{A3n} e^{\gamma_{2n} l_\Sigma} + A_{A4n} e^{-\gamma_{2n} l_\Sigma} + \right. \\ & \left. + A_{A5n} e^{\gamma_{3n} l_\Sigma} + A_{A6n} e^{-\gamma_{3n} l_\Sigma} + A_{A7n} e^{\gamma_{4n} l_\Sigma} + A_{A8n} e^{-\gamma_{4n} l_\Sigma} \right). \end{aligned}$$

Для упрощения используемых здесь математических формулировок следует ввести следующие обозначения:

$$\begin{aligned} B_{A1n} &= A_{A1n} e^{\gamma_{1n} l_\Sigma}, & B_{A2n} &= A_{A2n} e^{-\gamma_{1n} l_\Sigma}, \\ B_{A3n} &= A_{A3n} e^{\gamma_{2n} l_\Sigma}, & B_{A4n} &= A_{A4n} e^{-\gamma_{2n} l_\Sigma}, \\ B_{A5n} &= A_{A5n} e^{\gamma_{3n} l_\Sigma}, & B_{A6n} &= A_{A6n} e^{-\gamma_{3n} l_\Sigma}, \\ B_{A7n} &= A_{A7n} e^{\gamma_{4n} l_\Sigma}, & B_{A8n} &= A_{A8n} e^{-\gamma_{4n} l_\Sigma}. \end{aligned}$$

В таком случае уравнения распределения фазного напряжения линейного провода фазы A в конце анализируемого участка трехпроводной ЛЭП можно представить так:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} = \frac{1}{4} \big(& B_{A1n} e^{-\gamma_{1n}y} + B_{A2n} e^{\gamma_{1n}y} + B_{A3n} e^{-\gamma_{2n}y} + B_{A4n} e^{\gamma_{2n}y} + \\ & + B_{A5n} e^{-\gamma_{3n}y} + B_{A6n} e^{\gamma_{3n}y} + B_{A7n} e^{-\gamma_{4n}y} + B_{A8n} e^{\gamma_{4n}y} \big), \end{aligned} \quad (9)$$

где y – расстояние от конца анализируемого участка ЛЭП до места, где необходимо определить напряжение.

Уравнение распределения линейного тока в линии A от конца однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом в таком случае запишется так:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An} = \frac{1}{4} \bigg(& \frac{B_{A1n}}{\underline{Z}_{cA1n}} e^{-\gamma_{1n}y} - \frac{B_{A2n}}{\underline{Z}_{cA1n}} e^{\gamma_{1n}y} + \frac{B_{A3n}}{\underline{Z}_{cA2n}} e^{-\gamma_{2n}y} - \frac{B_{A4n}}{\underline{Z}_{cA2n}} e^{\gamma_{2n}y} + \\ & + \frac{B_{A5n}}{\underline{Z}_{cA3n}} e^{-\gamma_{3n}y} - \frac{B_{A6n}}{\underline{Z}_{cA3n}} e^{\gamma_{3n}y} + \frac{B_{A7n}}{\underline{Z}_{cA4n}} e^{-\gamma_{4n}y} - \frac{B_{A8n}}{\underline{Z}_{cA4n}} e^{\gamma_{4n}y} + \\ & + \frac{B_{B1n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} e^{-\gamma_{1n}y} - \frac{B_{B2n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} e^{\gamma_{1n}y} + \frac{B_{B3n}}{\underline{Z}_{cAB2n}} e^{-\gamma_{2n}y} - \frac{B_{B4n}}{\underline{Z}_{cAB2n}} e^{\gamma_{2n}y} + \\ & + \frac{B_{B5n}}{\underline{Z}_{cAB3n}} e^{-\gamma_{3n}y} - \frac{B_{B6n}}{\underline{Z}_{cAB3n}} e^{\gamma_{3n}y} + \frac{B_{B7n}}{\underline{Z}_{cAB4n}} e^{-\gamma_{4n}y} - \frac{B_{B8n}}{\underline{Z}_{cAB4n}} e^{\gamma_{4n}y} + \\ & + \frac{B_{C1n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} e^{-\gamma_{1n}y} - \frac{B_{C2n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} e^{\gamma_{1n}y} + \frac{B_{C3n}}{\underline{Z}_{cCA2n}} e^{-\gamma_{2n}y} - \frac{B_{C4n}}{\underline{Z}_{cCA2n}} e^{\gamma_{2n}y} + \\ & + \frac{B_{C5n}}{\underline{Z}_{cCA3n}} e^{-\gamma_{3n}y} - \frac{B_{C6n}}{\underline{Z}_{cCA3n}} e^{\gamma_{3n}y} + \frac{B_{C7n}}{\underline{Z}_{cCA4n}} e^{-\gamma_{4n}y} - \frac{B_{C8n}}{\underline{Z}_{cCA4n}} e^{\gamma_{4n}y} + \\ & + \frac{B_{D1n}}{\underline{Z}_{cAD1n}} e^{-\gamma_{1n}y} - \frac{B_{D2n}}{\underline{Z}_{cAD1n}} e^{\gamma_{1n}y} + \frac{B_{D3n}}{\underline{Z}_{cAD2n}} e^{-\gamma_{2n}y} - \frac{B_{D4n}}{\underline{Z}_{cAD2n}} e^{\gamma_{2n}y} + \\ & + \frac{B_{D5n}}{\underline{Z}_{cAD3n}} e^{-\gamma_{3n}y} - \frac{B_{D6n}}{\underline{Z}_{cAD3n}} e^{\gamma_{3n}y} + \frac{B_{D7n}}{\underline{Z}_{cAD4n}} e^{-\gamma_{4n}y} - \frac{B_{D8n}}{\underline{Z}_{cAD4n}} e^{\gamma_{4n}y} \bigg), \end{aligned}$$

где Z_{cA1n} , Z_{cA2n} , Z_{cA3n} , Z_{cA4n} – собственные волновые сопротивления фазного провода A первой, второй, третьей и четвертой пары волн электромагнитного поля на частоте n -й гармонической составляющей; Z_{cAB1n} , Z_{cAB2n} , Z_{cAB3n} , Z_{cAB4n} , Z_{cCA1n} , Z_{cCA2n} , Z_{cCA3n} , Z_{cCA4n} , Z_{cAD1n} , Z_{cAD2n} , Z_{cAD3n} , Z_{cAD4n} – взаимные волновые сопротивления фазных проводов, фазного провода A и грозозащитного троса D первой, второй, третьей и четвертой пары волн электромагнитного поля на частоте n -й гармонической составляющей.

Из этого уравнения видно, что на формирование каждого линейного тока оказывают влияние токи соседних линий. Соседние линии оказывают влияние и на формирование фазных напряжений через коэффициенты B_{A1n} , B_{A2n} , B_{A3n} , B_{A4n} , B_{A5n} , B_{A6n} , B_{B1n} , B_{B2n} , B_{B3n} , B_{B4n} , B_{B5n} , B_{B6n} , B_{C1n} , B_{C2n} , B_{C3n} , B_{C4n} , B_{C5n} и B_{C6n} . Прогнозирование основных характеристик электрической энергии можно выполнить только при известных численных значениях этих коэффициентов.

Для определения формул, с помощью которых можно определить численные значения искомых коэффициентов для линейного провода A исследуемого участка ЛЭП, необходимо использовать уравнение (9).

Для конца анализируемого участка ЛЭП ($y=0$) уравнение (9) примет вид

$$\dot{U}_{1An} = \frac{1}{4}(B_{A1n} + B_{A2n} + B_{A3n} + B_{A4n} + B_{A5n} + B_{A6n} + B_{A7n} + B_{A8n}). \quad (10)$$

Уравнение (10) содержит восемь неизвестных. Это значит, что необходимо еще семь дополнительных уравнений. Для этого необходимо вычислить семь производных уравнения (10), в итоге совместное решение полученных уравнений позволит определить искомые коэффициенты, а затем и постоянные интегрирования для линейного провода фазы A исследуемой ЛЭП. После этого уже ничто не мешает определить напряжения практически в любом месте на линейном проводе A .

Аналогично определяются и напряжения на других токоведущих частях и грозозащитном тросе анализируемого участка ЛЭП.

Взаимосвязь напряжений и токов обусловлена первичными параметрами участка ЛЭП конечной протяженности [19]. И чем больше протяженность исследуемого участка ЛЭП, тем больше проявляется влияние первичных параметров линии электропередачи на взаимосвязь напряжений и токов. Следовательно, наибольшее проявление этого процесса наблюдается в конце анализируемого участка трехфазной трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом.

На основании результатов вычисления постоянных интегрирования можно, используя полученные уравнения, выполнить прогнозирование напряжений и токов в любом месте однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения, отстающих от его конца на расстояние y .

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пусть исследованию подлежит однородный участок воздушной линии ЛЭП-220 кВ протяженностью 300 км. Его первичные параметры на частоте основной гармонической составляющей имеют следующие значения:

$$\begin{aligned}
 R_{0An} &= 0,44 \text{ Ом/км}, & R_{0Bn} &= 0,41 \text{ Ом/км}, \\
 R_{0Cn} &= 0,42 \text{ Ом/км}, & R_{0Dn} &= 0,82 \text{ Ом/км}, \\
 L_{0An} &= 1,3369 \text{ мГн/км}, & L_{0Bn} &= 1,3215 \text{ мГн/км}, \\
 L_{0Cn} &= 1,3300 \text{ мГн/км}, & L_{0Dn} &= 1,6600 \text{ мГн/км}, \\
 M_{0ABn} &= 7,488 \text{ Гн/км}, & M_{0BCn} &= 7,489 \text{ Гн/км}, \\
 M_{0CAn} &= 7,487 \text{ Гн/км}, & M_{0ADn} &= 9,486 \text{ Гн/км}, \\
 M_{0BDn} &= 9,489 \text{ Гн/км}, & M_{0CDn} &= 9,487 \text{ Гн/км}, \\
 C_{0A0n} &= 10^{-8} \text{ мкФ/км}, & C_{0B0n} &= 8,5 \cdot 10^{-9} \text{ мкФ/км}, \\
 C_{0C0n} &= 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ мкФ/км}, & C_{0D0n} &= 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ мкФ/км}, \\
 C_{0ABn} &= 8 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}, & C_{0BCn} &= 7 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}, \\
 C_{0CAn} &= 9 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}, & C_{0ADn} &= 5 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}, \\
 C_{0BDn} &= 5 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}, & C_{0CDn} &= 5 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}.
 \end{aligned}$$

Активным проводимостям G_{0A0n} , G_{0B0n} , G_{0C0n} , G_{0D0n} и G_{0ABn} , G_{0BCn} , G_{0CAn} , G_{0ADn} , G_{0BDn} , G_{0CDn} ввиду их относительной малости предлагается присвоить нулевые значения.

Точное определение первичных параметров исследуемого участка ЛЭП можно выполнить экспериментально, руководствуясь методиками, изложенными в [17].

Постоянные распространения волн электромагнитного поля на частоте основной гармонической составляющей в таком случае определяются величинами:

$$\begin{aligned}
 \gamma_{1n} &= (0 - 10j) \text{ км}^{-1}, & \gamma_{2n} &= (0 + j) \text{ км}^{-1}, \\
 \gamma_{3n} &= (0 + 10j) \text{ км}^{-1}, & \gamma_{4n} &= (0 + 10j) \text{ км}^{-1}.
 \end{aligned}$$

А постоянные распространения волн электромагнитного поля на частоте 13-й гармонической составляющей примут значения:

$$\gamma_{1n} = (0,0016 + 9,9972j) \text{ км}^{-1}, \quad \gamma_{2n} = (0,0025 - 8j) \text{ км}^{-1},$$

$$\gamma_{3n} = (0,0032 + 10j) \text{ км}^{-1}, \quad \gamma_{4n} = (0,0036 + 10j) \text{ км}^{-1}.$$

Тогда графическая интерпретация распределения напряжения фазы *A* вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП с учетом грозозащитного троса на частоте основной гармонической составляющей от его конца будет выглядеть, как это показано на рис. 2.

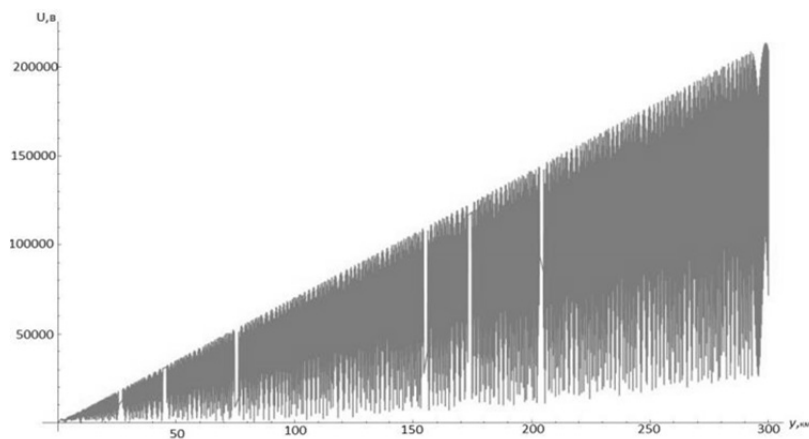


Рис. 2. Графическая интерпретация распределения фазного напряжения от конца однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте основной гармонической составляющей

Для 13-й гармонической составляющей напряжения, передаваемого по исследуемому участку ЛЭП, подобная графическая интерпретация представлена на рис 3.

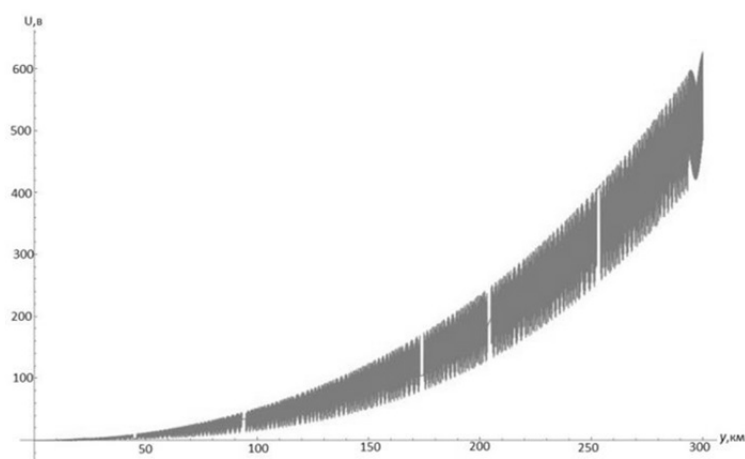


Рис. 3. Графическая интерпретация распределения фазного напряжения от конца однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте 13-й гармонической составляющей

На основании данных графиков можно визуально выполнить анализ распределения напряжения по однородному участку линейного провода фазы *A* исследуемой ЛЭП, определить длину результирующей волны электрического поля, передаточные функции для напряжения линейного провода *A*, спектральные плотности входных и выходных характеристик напряжения и много другое.

Всё это применимо для абсолютно однородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом. Выявить такие участки достаточно сложно. При исследовании результатов передачи электрической энергии по реальной линии электропередачи исследуемую ЛЭП целесообразно разбить на множество хотя бы относительно однородных участков [8, 20]. Определение первичных и вторичных параметров таких участков, а также входных и выходных характеристик напряжения и тока является достаточно сложной задачей. Но она существенно упрощается при использовании теории многополюсников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При анализе распределения электрической энергии пониженного качества по трехфазной ЛЭП необходимо учитывать все электромагнитные связи, в том числе электромагнитные связи между линейными проводами, проводами и грозозащитным тросом.

2. Формирование законов распределения напряжения и токов вдоль однородного участка трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом в условиях пониженного качества передаваемой электроэнергии выполняется на основании математической модели рассматриваемого процесса.

3. Прогнозирование численных значений напряжений в любом месте на однородном участке ЛЭП трехпроводного исполнения, отстоящем от его начала на расстояние *l* или на расстояние *y* от его конца, возможно при условии наличия достоверных сведений о численных значениях постоянных распространения волн электромагнитного поля и постоянных интегрирования, а также о напряжениях и токах в начале или в конце анализируемого участка линии электропередачи.

4. Достоверность методики подтверждается результатами компьютерного эксперимента.

5. Предлагаемая методика применима только для однородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом. Выявить такие участки достаточно сложно, в этом случае исследуемую ЛЭП целесообразно разбить на множество относительно однородных участков и применить теорию многополюсников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишков Е.М., Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г. Влияние несимметрии параметров двухцепной воздушной линии электропередачи на установившиеся // *Электричество*. – 2013. – № 4. – С. 9–18.
2. Плотников М.П. Подход к расчету высших гармоник и системное прогнозирование в электроэнергетике // *Технические науки – от теории к практике*. – 2011. – № 4. – С. 17–21.

3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
4. Альмендеев А.А., Косорлуков И.А., Шишков Е.М. Математическая модель для расчета установившихся режимов двухцепных воздушных линий // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2009. – № 2 (24). – С. 212–214.
5. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем. В 2 кн. Кн. 2. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 807 с.
6. Большанин Г.А., Плотников М.П. Длина волны электромагнитного поля в двухцепных линиях электропередачи // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2016. – Т. 1. – С. 22–26.
7. Исаев Ю.Н., Старцева Е.В., Щекотуев А.В. Исследование волновых процессов обмоток трансформатора как цепи с распределенными параметрами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 8. – С. 29–35.
8. Шишков Е.М., Шишкова Л.И. Обобщенная модель неоднородной многоцепной воздушной линии электропередачи для расчетов установившихся режимов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2015. – № 1. – С. 136–141.
9. Большанин Г.А., Шевченко М.А. Полнофазная схема замещения трехфазной трехпроводной линии электропередачи с учетом грозозащитного троса // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2015. – Т. 2. – С. 101–105.
10. Шевченко М.А., Большанин Г.А. Формирование полнофазной схемы замещения трехфазной трехпроводной ЛЭП с учетом грозозащитного троса // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2015. – Т. 2. – С. 106–111.
11. Плотников М.П., Большанин Г.А. Особенности схемы замещения трехфазной двухцепной ЛЭП пониженного качества электроэнергии // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2012. – Т. 2. – С. 126–128.
12. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 488 с.
13. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по однородному трехфазному трехпроводному участку ЛЭП // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2009. – № 4. – С. 135–144.
14. Шевченко М.А., Большанин Г.А. Учет грозозащитного троса при моделировании передачи электрической энергии пониженного качества // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 3 (31). – С. 135–142.
15. Плотников М.П., Большанин Г.А. Оптимизация математической модели трехфазной двухцепной ЛЭП // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2012. – Т. 2. – С. 122–126.
16. Большанин Г.А., Марьясова Е.Г. Характеристическое уравнение однородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 2. – С. 60–62.
17. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Параметры трехпроводной ЛЭП. Метод восьми-полюсника. – Братск: Изд-во БрГУ, 2013. – 265 с.
18. Большанин Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнения: монография. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 313 с.
19. Большанин Г.А. Математическое моделирование распределения энергии низкого качества по двухпроводному неоднородному неразветвленному участку ЛЭП // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: межвузовский тематический сборник трудов. – СПб., 2005. – Вып. 11. – С. 204–210.
20. Мюльбаер А.А. Особенности расчета наведенного напряжения на отключенной цепи двухцепной воздушной линии электропередачи // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 3 (64). – С. 146–160.

Большанин Георгий Анатольевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электротехники Братского государственного университета. Основные направления научных исследований: качество электрической энергии, распределение электрической энергии пониженного качества по воздушным линиям электропередачи, теория многополюсников. Имеет более 300 публикаций, в том числе 11 монографий. E-mail: bolshaning@mail.ru

Шевченко Михаил Алексеевич, аспирант кафедры электроэнергетики и электротехники Братского государственного университета. Основные направления научных исследований: качество электрической энергии, передача электроэнергии по воздушным линиям большой протяженности, определение места подключения нагрузки к действующей воздушной линии. Имеет 6 публикаций. E-mail: shevchenkomix@hotmail.com

Method for predicting voltages in a three-phase overhead line with a ground wire in conditions of reduced quality of electric energy*

G.A. BOL'SHANIN¹, M.A. SHEVCHENKO²

¹Bratsk State University, 40, Makarenko Street, Bratsk, 665709, Russian Federation, PhD (Eng.), professor. E-mail: bolshaning@mail.ru

²Bratsk State University, 40, Makarenko Street, Bratsk, 665709, Russian Federation, post-graduate student (Eng.). E-mail: shevchenkomix@hotmail.com

Electric energy currently transmitted via high-voltage power transmission lines is characterized by reduced quality. This fact complicates a quite difficult task of determining voltage at any point of the investigated overhead transmission line. In papers published by V.A. Veniko, V.I. Idelchik and A.A. Almendeev, a transmission lines is considered as a line with lumped parameters, mutual influence of wires, but the ground wire is not taken into account. Moreover, single-wire transmission line equivalent circuits form the basis for analyzing electric power transmission. However, E.M. Shishkov and A.S. Vedernikov in their papers mention that not taking into account the ground wire, using single-wire equivalent circuits, neglecting the asymmetry of the primary parameters of the overhead line introduces a significant error in the results of calculating electric modes, especially with reduced quality of electric energy. The purpose of the study is to create a technique for predicting voltages in a three-phase overhead line with a ground wire under conditions of reduced quality of electric energy. This technique is based on the wave theory of electrical energy distribution. The investigated section of the transmission line is considered as a line with distributed parameters and phase-to-phase distribution equations are formed on the basis of a full-phase equivalent circuit that takes into account all electromagnetic couplings including electromagnetic couplings between linear wires and the ground wire. The proposed technique involves determining the values of the integration constants taking into account the interconnection of voltages and currents of neighboring wires. Graphical interpretations of voltage distribution along a homogeneous section of the three-phase three-wire transmission line are constructed taking into account the ground wire at the frequencies of the main and thirteenth harmonic components. They allow you to visually perform voltage prediction on the sections of the transmission line of different lengths, determine the length of the resulting wave of the electric field, and generate transfer functions for phase voltages.

Keywords: Voltage, incident wave, reflected wave, propagation constants, integration constants, mathematical model, quality of electric energy, non-sinusoidal, asymmetry

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-4-163-178

* Received 01 November 2017.

REFERENCES

1. Shishkov E.M., Vedernikov A.S., Gol'dshtein V.G. Vliyaniye nesimmetrii parametrov dvukhtsepoi vozduшной linii elektropredachi na ustanovivshiesya [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.
2. Plotnikov M.P. Podkhod k raschetu vysshikh garmonik i sistemnoye prognozirovaniye v elektroenergetike [Approach to the calculation of higher harmonics and system forecasting in the electric power industry]. *Tekhnicheskoe nauki – ot teorii k praktike – Technical Sciences: from theory to practice*, 2011, no. 4, pp. 17–21.
3. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in power supply systems for industrial enterprises]. 4th ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 331 p.
4. Al'mendeiev A.A., Kosorlukov I.A., Shishkov E.M. Matematicheskaya model' dlya rascheta ustanovivshikhsya rezhimov dvukhtsepykh vozdušnykh linii [Mathematical model for calculation of steady-state regimes of double-circuit overhead lines]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki" – Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2009, no. 2 (24), pp. 212–214.
5. Bol'shanin G.A. *Raspredeleniye elektricheskoy energii ponizhennogo kachestva po uchastkam elektroenergeticheskikh sistem*. V 2 kn. Kn. 2 [Distribution of an electrical energy of the lowered quality on sites of electrical power systems. In 2 bk. Bk. 2]. Bratsk, BRGU Publ., 2006. 807 p.
6. Bol'shanin G.A., Plotnikov M.P. Dlina volny elektromagnitnogo polya v dvukhtsepykh liniyakh elektropredachi [The wavelength of the electromagnetic field in double-circuit power lines]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2016, vol. 1, pp. 22–26.
7. Isaev Yu.N., Startseva E.V., Shchekotuev A.V. Issledovanie volnovykh protsessov obmotok transformatora kak tsepi s raspredelennymi parametrami [Investigation of the wave processes of the windings of a transformer in a circuit with distributed parameters]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*, 2015, vol. 326, no. 8, pp. 29–35.
8. Shishkov E.M., Shishkova L.I. Obobshchennaya model' neodnorodnoi mnogotsepoi vozduшной linii elektropredachi dlya raschetov ustanovivshikhsya rezhimov [A generalized model of an inhomogeneous multi-chain overhead transmission line for calculating steady-state regimes]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki" – Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2015, no. 1, pp. 136–141.
9. Bol'shanin G.A., Shevchenko M.A. Polnofaznaya skhema zameshcheniya trekhfaznoi trekhprovodnoi linii elektropredachi s uchetom grozozashchitnogo troska [Full-phase circuit for replacing a three-phase three-wire transmission line with a lightning protection cable]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2015, vol. 2, pp. 101–105.
10. Shevchenko M.A., Bol'shanin G.A. Formirovaniye polnofaznoi skhemy zameshcheniya trekhfaznoi trekhprovodnoi LEP s uchetom grozozashchitnogo troska [Formation of a full-phase circuit for replacing a three-phase three-wire power line with the lightning protection cable]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2015, vol. 2, pp. 106–111.
11. Plotnikov M.P., Bol'shanin G.A. Osobennosti skhemy zameshcheniya trekhfaznoi dvukhtsepoi LEP ponizhennogo kachestva elektroenergii [Features of the scheme for replacing a three-phase double-circuit power line with a reduced quality of electricity]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2012, vol. 2, pp. 126–128.
12. Ryzhov Yu.P. *Dal'nie elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Distant electricity transmissions of ultrahigh tension]. Moscow, MEI Publ., 2007. 488 p.
13. Bol'shanin G.A. Raspredeleniye elektricheskoy energii ponizhennogo kachestva po odnorodnomu trekhfaznomu trekhprovodnomu uchastku LEP [Distribution to electric energy lowered quality on uniform three-phase three-wire area transmission line]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 4, pp. 135–144.
14. Shevchenko M.A., Bol'shanin G.A. Uchet grozozashchitnogo troska pri modelirovaniy peredachi elektricheskoy energii ponizhennogo kachestva [Accounting for a lightning-proof cable in the simulation of low-quality electric power transmission]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2016, no. 3 (31), pp. 135–142.

15. Plotnikov M.P., Bol'shanin G.A. Optimizatsiya matematicheskoi modeli trekhfaznoi dvukhtsepoi LEP [Optimization of the mathematical model of a three-phase double-circuit power line]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2012, vol. 2, pp. 122–126.
16. Bol'shanin G.A., Mar'yasova E.G. Kharakteristicheskoe uravnenie odnorodnogo uchastka trekhfaznoi trekhprovodnoi LEP [The characteristic equation of a homogeneous section of a three-phase three-wire transmission line]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2009, no. 2, pp. 60–62.
17. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. *Parametry trekhprovodnoi LEP. Metod vos'mipolyusnika* [Parameters of a three-wire power line. The method of the eight-terminal network]. Bratsk, BRGU Publ., 2013. 265 p.
18. Bol'shanin G.A. *Peredacha elektricheskoi energii po LEP odno-, dvukh- i trekhprovodnogo ispolneniya* [Transfer of an electrical energy on the power line one- two- and three-wire execution]. Bratsk, BRGU Publ., 2016. 313 p.
19. Bol'shanin G.A. Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya energii nizkogo kachestva po dvukhprovodnomu neodnorodnomu nerazvetvlennomu uchastku LEP [Mathematical modeling of low-quality energy distribution over a two-wire non-uniform unbranched portion of the power transmission line]. *Matematicheskoe modelirovanie, chislennye metody i komplekсы программ* [Mathematical modeling, numerical methods and complexes of programs]. St. Petersburg, 2005, iss. 11, pp. 204–210.
20. Myul'baer A.A. Osobennosti rascheta navedennogo napryazheniya na otklyuchennom tsepi dvukhtsepoi vozduшной linii elektroperedachi [Specificity of induced voltage calculation in the disconnected circuit of a double-circuit overhead electric power transmission line]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3, pp. 146–160.

Для цитирования:

Шевченко М.А., Большанин Г.А. Методика прогнозирования напряжений в трехфазной воздушной линии с грозозащитным тросом в условиях пониженного качества электрической энергии // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 4 (69). – С. 163–178. – doi: 10.17212/1814-1196-2017-4-163-178.

For citation:

Shevchenko M.A., Bol'shanin G.A. Metodika prognozirovaniya napryazhenii v trekhfaznoi vozduшной linii s grozozashchitnym trosom v usloviyakh ponizhennogo kachestva elektricheskoi energii [Method for predicting voltages in a three-phase overhead line with a ground wire in conditions of reduced quality of electric energy]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (69), pp. 163–178. doi: 10.17212/1814-1196-2017-4-163-178.