



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХПРОВОДНОЙ ЛЭП

**Г.А. Большанин, М.П. Плотников, М.А. Шевченко**

**Братский государственный университет, г. Братск, Россия**  
ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0003-4017-6732> [plotnikov\\_m.p@mail.ru](mailto:plotnikov_m.p@mail.ru)  
[shevchenkomic@hotmail.com](mailto:shevchenkomic@hotmail.com)

**Резюме:** Для определения результатов передачи электрической энергии по линии электропередачи (ЛЭП) от источника к потребителю необходимо иметь точные сведения о параметрах данной линии. Определить эти параметры для действующих линий с минимальной погрешностью достаточно трудоёмко. Но если исследователя интересуют лишь напряжения и токи в конце и в начале однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения, то для этого достаточно использовать теорию многополюсников. В частности, теорию восьмиполюсников. В статье представлена методика экспериментального определения продольных и поперечных параметров исследуемой ЛЭП. В исследовании использовались методы натурального эксперимента с использованием соответствующего парка электроизмерительных приборов, методы косвенного измерения искомых величин. Эксперимент состоит из шести этапов, на основании полученных данных появляется возможность определить численные значения основных параметров исследуемого участка ЛЭП, с учетом которых возможно установить количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии. Кроме того, описываемая методика, в принципе, может быть применена и для анализа активных восьмиполюсников подобного исполнения. Это значит, что предлагаемая методика может обеспечить всесторонний анализ исследуемого объекта и поможет идентифицировать параметры воздушной ЛЭП на этапе строительства или ее подключения для потребителя. В статье представлена схема опытной установки, описаны методики проведения опытов, оценена погрешность результатов расчета.

**Ключевые слова:** восьмиполюсник, экспериментальное определение параметров восьмиполюсников, напряжение, ток, трёхпроводная ЛЭП.

**Благодарности:** Особую благодарность в написании статьи авторы выражают Большанину Г.А.

**Для цитирования:** Большанин Г.А., Плотников М.П., Шевченко М.А. Экспериментальное определение параметров трёхпроводной ЛЭП // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С. 85-94. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-85-94.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE EIGHT-POLE

**G.A. Bol'shanin, M.P. Plotnikov, M.A. Shevchenko**

**Bratsk State University, Bratsk, Russia**  
ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0003-4017-6732> [plotnikov\\_m.p@mail.ru](mailto:plotnikov_m.p@mail.ru)  
[shevchenkomic@hotmail.com](mailto:shevchenkomic@hotmail.com)

**Abstract:** To determine the results of the transmission of electrical energy through the power line from the source to the consumer, it is necessary to have accurate information about the parameters of such line. Determining these parameters for operating lines with a minimum error is quite a laborious process. But if a researcher is interested only in voltages and currents at the end and at the beginning of a homogeneous section of a three-wire transmission line, then it is sufficient to use the theory of multipoles. In particular, the theory of eight-poles. The article presents the method of experimental determination of the longitudinal and transverse parameters of the studied transmission line. The study used the methods of natural experiment using an

*appropriate fleet of electrical devices, and methods of indirect measurement of the desired parameters. The experiment consists of six stages; on the basis of the obtained data, it becomes possible to determine the numerical values of the main parameters of the studied section of power transmission lines, with which it is possible to establish a quantitative relationship between the input and output characteristics of electrical energy. In addition, the described method, in principle, can be applied to the analysis of active eight-terminal networks of a similar design. This means that the proposed methodology can provide a comprehensive analysis of the studied object and will help to identify the parameters of an overhead power line at the construction stage or for its connection to the consumer. The article presents the experimental setup scheme, describes the experimental methods, and estimates the error of the calculation results.*

**Keywords:** *eight-pole, experimental determination of the parameters of eight-pole, voltage, current, three-wire power lines.*

**For citation:** Bol'shanin GA, Plotnikov MP, Shevchenko MA. Experimental determination of the parameters of the eight-pole. *Power engineering: research, equipment, technology*.2019; 21(4):85-94. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-85-94.

### **Введение**

Для определения результатов передачи электрической энергии по линии электропередачи от источника к потребителю необходимо иметь точные сведения о параметрах данной линии.

В соответствии с существующей практикой определение параметров воздушных линий (ВЛ) производится с использованием справочных данных по удельным характеристикам для соответствующих типов проводов и класса напряжения с учетом длины ВЛ.

Справочная литература<sup>1</sup> типа дает весьма ориентировочные сведения о первичных параметрах, как правило, отличающиеся от реальных. Определение первичных параметров ЛЭП по методикам, аналогичным описанным в литературе [1–7], технически трудноосуществимо, поскольку предполагает наличие сведений о специфических факторах. А их множество. И учет всех этих факторов представляет собой трудоемкую задачу, решение которой не всегда обеспечивает оперативность получения достоверных результатов. Наиболее достоверные сведения о первичных параметрах однородного участка ЛЭП позволяют получить экспериментальные исследования [8-14]. Но здесь могут возникнуть как технические, так и организационные сложности. В данном случае приходится искать возможные альтернативные решения.

При этом если исследователю требуется определить лишь напряжения и токи в конце и в начале однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения, то для получения результатов передачи электрической энергии по исследуемому участку ЛЭП можно использовать теорию многополюсников, в частности, теорию восьмиполюсников [15-17].

### **Материалы и методы исследования**

Однородный участок ЛЭП трехпроводного исполнения может быть замещен восьмиполюсником (рис. 1).

Многополюсник, в данном случае восьмиполюсник, является для исследователя «черным ящиком», для которого описаны входные и выходные параметры. Для определения свойств исследуемого восьмиполюсника требуется провести серию экспериментов.

Вариантов исполнения экспериментальной установки для определения численных значений восьмиполюсника может быть множество. Схемное решение одного из вариантов исполнения такой экспериментальной установки изображено на рис. 2.

---

<sup>1</sup> Электротехнический справочник в 4-х т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии. / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). 9-е изд., стер. М.: Издательство МЭИ, 2004. с. 197-198, 201-202.

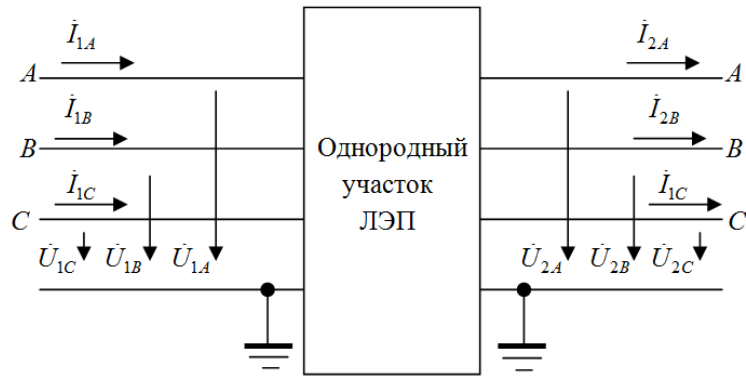


Рис. 1. Восьмиполюсник, замещающий однородный участок ЛЭП трехпроводного исполнения

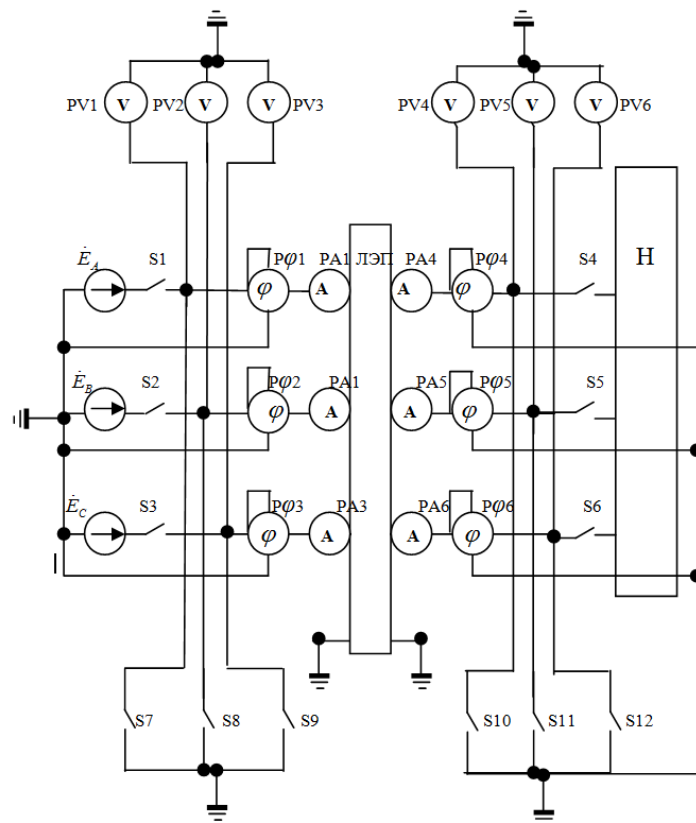


Рис. 2. Схема серии экспериментов для определения коэффициентов восьмиполюсника, замещающего однородный участок трехпроводной ЛЭП

В данной схеме участвуют: источник трехфазной ЭДС  $\dot{E}_A$ ,  $\dot{E}_B$  и  $\dot{E}_C$  или три источника однофазных, равных по величине ЭДС, начальные фазы которых сдвинуты относительно друг друга на треть периода, желательно пониженного напряжения; шесть вольтметров  $PV1 - PV6$ ; шесть амперметров  $PA - PA6$ ; шесть фазометров  $P\phi 1 - P\phi 6$ ; двенадцать коммутирующих устройств  $S1 - S12$ , в качестве которых могут быть использованы обычные выключатели или рубильники.

В качестве нагрузки  $H$  может быть использован практически любой трехфазный потребитель электрической энергии или три однофазных. На качество экспериментов тип потребителя практически не окажет никакого влияния.

Для определения искомых коэффициентов надо выполнить серию экспериментов из 6 (шести) опытов. Целью этих опытов является определение параметров восьмиполюсника, а также определение изображений на комплексной плоскости входных и выходных напряжений и токов при различных режимах работы анализируемого восьмиполюсника.

Первый опыт может быть выполнен в обычном состоянии однородного участка ЛЭП, в режиме передачи электрической энергии нагрузке  $H$ .

При выполнении этого опыта ключи  $S1 - S6$  должны быть замкнуты, а ключи  $S7 -$

S12 – разомкнуты.

В качестве источника энергии в этом опыте может быть использован как автономный генератор трехфазной ЭДС пониженного напряжения, так и действующая электроэнергетическая система. Нужно только подобрать соответствующие электроизмерительные приборы.

Модули входных фазных напряжений  $U_{1A1}$ ,  $U_{1B1}$  и  $U_{1C1}$  регистрируют вольтметры PV1 – PV3, а выходных:  $U_{2A1}$ ,  $U_{2B1}$  и  $U_{2C1}$  – вольтметры PV4 – PV6.

Модули входных линейных токов  $I_{1A1}$ ,  $I_{1B1}$  и  $I_{1C1}$  регистрируют амперметры PA1 – PA3, а выходных:  $I_{2A1}$ ,  $I_{2B1}$  и  $I_{2C1}$  – амперметры PA4 – PA6.

Фазометры Pφ1 – Pφ6, если они подключены к исследуемой ЛЭП так, как показано на рис. 2, регистрируют разность начальных фаз соответствующих напряжений и токов. Так, фазометр Pφ1 регистрирует разность начальных фаз напряжения  $U_{1A1}$  и тока  $I_{1A1}$ :  $\varphi_1 = \varphi_{1uA1} - \varphi_{1iA1}$ ; фазометр Pφ2 – разность начальных фаз напряжения  $U_{1B1}$  и тока  $I_{1B1}$ :  $\varphi_2 = \varphi_{1uB1} - \varphi_{1iB1}$ ; фазометр Pφ3 – разность начальных фаз напряжения  $U_{1C1}$  и тока  $I_{1C1}$ :  $\varphi_3 = \varphi_{1uC1} - \varphi_{1iC1}$ ; фазометр Pφ4 – разность начальных фаз напряжения  $U_{2A1}$  и тока  $I_{2A1}$ :  $\varphi_4 = \varphi_{2uA1} - \varphi_{2iA1}$ ; фазометр Pφ5 – разность начальных фаз напряжения  $U_{2B1}$  и тока  $I_{2B1}$ :  $\varphi_5 = \varphi_{2uB1} - \varphi_{2iB1}$ ; фазометр Pφ6 – разность начальных фаз напряжения  $U_{2C1}$  и тока  $I_{2C1}$ :  $\varphi_6 = \varphi_{2uC1} - \varphi_{2iC1}$

На основании схемы эксперимента (рис. 2) аналогично первому опыту проводятся остальные пять опытов: опыт холостого хода – он предполагает отключение от конца исследуемой линии электропередачи электрической нагрузки  $H$ . Для этого необходимо разомкнуть ключи S4 – S6. Кроме того, должны быть разомкнуты ключи S7 – S12. Ключи S1 – S3 должны остаться замкнутыми. Опыт короткого замыкания фазы A на землю, данный опыт отличается от второго тем, что замыкается ключ S10. Остальные ключи остаются в прежнем состоянии. И остальные опыты короткого замыкания фазы B, фазы C и фаз B, C на землю проводятся аналогично.

### Эксперимент

На базе кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета был проведен эксперимент по определению численных значений коэффициентов восьмиполосника с применением соответствующего парка электроизмерительных приборов и модели воздушной линии электропередачи. На рис. 3 показана фотография стенда испытательной установки.

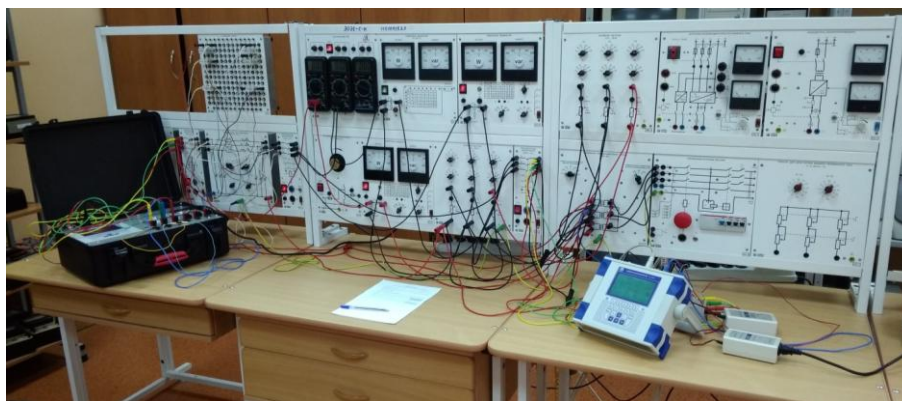


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки

Параметры модели воздушной линии представлены в табл. 1, схема модели линии показана на рис. 4. Связи между фазными проводами модели воздушной линии были учтены включением конденсаторов емкостью 0,1 мкФ по схеме рис. 4.

С целью исключения некорректных показаний, вызванных некачественной электроэнергией из сети авторами было принято решение использовать программируемый трехфазный источник синусоидальной ЭДС «Энергоформа 3.3».

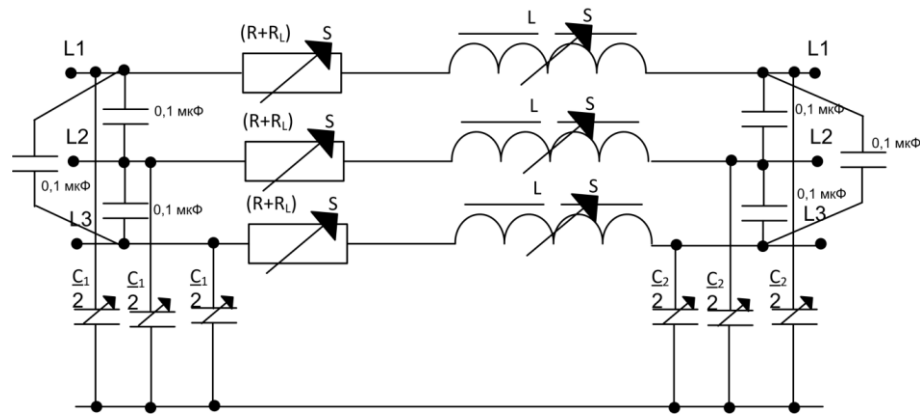


Рис. 4. Схема модели исследуемой ВЛ

Измерение требуемых входных и выходных параметров исследуемой модели ЛЭП производилось с помощью прибора для измерения электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии «Энергомонитор-3.3Т1».

Методика экспериментального определения продольных и поперечных параметров исследуемого восьмиполосника однотипна для всех трёх фаз исследуемой ВЛ, поэтому в дальнейшем в статье будет рассмотрен вариант расчета для фазного провода *A*. Следовательно, целесообразно представить в статье всего три опыта: работа воздушной линии в режиме нагрузки, опыт холостого хода и опыт короткого замыкания фазы *A* на землю. Полученные данные трёх экспериментов сведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Параметры модели исследуемой воздушной линии электропередачи

$R, \text{ Ом}$	$L/R_L, \text{ Гн}\backslash\text{Ом}$	$C_1/2$	$C_2/2$
0	1,2/32	0,58	0,58

Таблица 2

Входные параметры модели исследуемой воздушной линии опыт 1

Измеряемая фаза	$U, \text{ в}$	$I, \text{ mA}$	$\varphi, \text{ Град.}$	$\Psi_U, \text{ Град.}$	$\Psi_I, \text{ Град.}$	
<i>A</i>	7,13	7,24	-7,14	0	7,14	Угол между $U_a-I_b, \text{ Град.}$ 111
<i>B</i>	7,16	7,38	-7,32	-118,32	-111	
<i>C</i>	7,2	7,51	-6,99	123,03	128	Угол между $U_a-I_c, \text{ Град.}$ -128

**Опыт 1.** Работа воздушной линии в режиме нагрузки. Полученные в ходе эксперимента данные приведены в табл. 2, 3.

Таблица 3

Выходные параметры модели исследуемой воздушной линии опыт 1

Измеряемая фаза	$U, \text{ в}$	$I, \text{ mA}$	$\varphi, \text{ Град.}$	$\Psi_U, \text{ Град.}$	$\Psi_I, \text{ Град.}$	
<i>A</i>	7,02	7,12	0,038	-22,262	-22,3	Угол между $U_a-I_a, \text{ Град.}$ 22,3
<i>B</i>	7,04	7,16	-0,02	140,282	140,262	Угол между $U_a-I_b, \text{ Град.}$ 118
<i>C</i>	7,05	7,27	-0,04	98,698	98,738	Угол между $U_a-I_c, \text{ Град.}$ 22,3

На основании полученных данных при помощи законов Кирхгофа и схемы замещения восьмиполосника появляется возможность для определения численных значений продольных и поперечных параметров, характеризующих состояние пассивного восьмиполосника с четырьмя входными и четырьмя выходными выводами. Использование полученных значений параметров 8-полосника позволит установить количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии, каковыми являются напряжения и токи в начале и конце исследуемого участка ЛЭП.

**Методика расчета продольных и поперечных параметров исследуемого участка ВЛ. Определение погрешности метода. Результаты эксперимента**

Исследуемый восьмиполосник можно представить в виде П-образной схемы замещения, показанной на рис. 5.

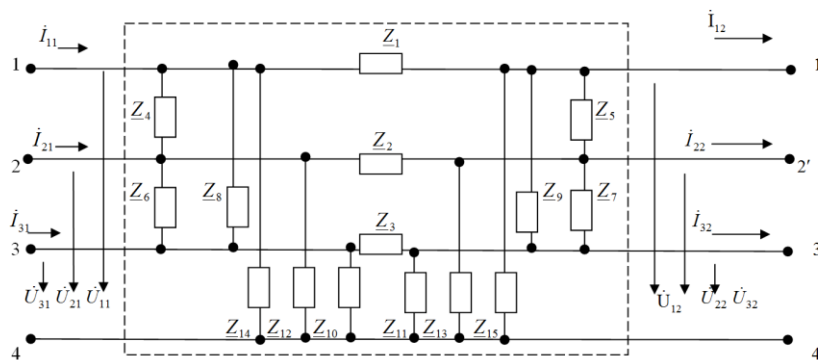


Рис. 5. Схемное решение пассивного восьмиполосника с четырьмя входными и четырьмя выходными выводами П-образного исполнения

На рис. 5 символы  $Z_1, Z_2, Z_3$  иллюстрируют продольные сопротивления линейных проводов фаз *A, B, C* соответственно, замещающие продольные параметры однородного участка ЛЭП трёхпроводного исполнения; символы  $Z_4, Z_6, Z_8$  – волновые сопротивления между линейными проводами в начале воздушной линии; символы  $Z_{10}, Z_{12}, Z_{14}$  – волновые сопротивления между линейными проводами и заземленными конструктивными элементами ЛЭП, замещающие поперечные параметры в начале воздушной линии.

Символы  $i_{11}, i_{21}, i_{31}$  иллюстрируют ток, протекающий в фазных проводах исследуемой ЛЭП; символы  $\dot{U}_{11}, \dot{U}_{21}, \dot{U}_{31}$  – падение напряжения в начале исследуемого участка ВЛ [15]; символы  $Z_5-Z_{15}, i_{12}-i_{32}, \dot{U}_{12}-\dot{U}_{32}$  – аналогичные параметры в конце исследуемого участка ВЛ.

**Расчет продольных параметров исследуемого участка ВЛ**

Волновое сопротивление линейного провода фазы *A* определяется по формуле

$$Z_1 = \frac{U_{1A}^{(3)}}{I_{2A}^{(3)}}$$

где  $U_{1A}^{(3)}$  – напряжение в фазе *A* в начале исследуемого участка, полученное в ходе опыта №3;  $I_{2A}^{(3)}$  – ток, протекающий по линейному проводу *A*, в конце исследуемого участка, значение которого получено в опыте №3.

$$Z_1 = \frac{7,283 \cdot e^{i0}}{0,018985 \cdot e^{-i83,757}} = 384,3271 \cdot e^{i83,757} = 41,7938 + i382,0479, \text{ Ом.}$$

Волновые сопротивления фазных проводов *B* и *C* определяются аналогично.

**Расчет поперечных параметров**

Для расчета поперечных параметров исследуемой модели ВЛ требуется для каждого линейного провода составить схему замещения, которая позволит определить искомые параметры. Для фазы *A* была составлена схема замещения, показанная на рис. 6.

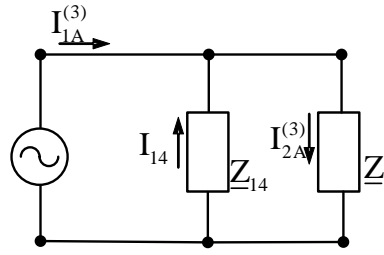


Рис. 6. Схема замещения для участка исследуемой модели ВЛ

На основании законов Кирхгофа составлены уравнения для определения  $I_{14}$ , и  $Z_{14}$ :

$$I_{14} = I_{2A}^{(3)} - I_{1A}^{(3)} = 0,0185 \cdot e^{-i82,1} - 0,0173 \cdot e^{-i81,1} = 0,0012399 \cdot e^{-i83,805} \text{ А.}$$

где  $I_{2A}^{(3)}$  – ток в конце исследуемой ЛЭП в фазе А;  $I_{1A}^{(3)}$  – ток в начале исследуемой ЛЭП в фазе А, значения которых получены в третьем опыте;

$$Z_{14} = \frac{U_{1A}^{(3)}}{I_{14}^{(3)}} = \frac{7,23 \cdot e^{i0}}{0,0012399 \cdot e^{-i83,805}} = 5831,15 \cdot e^{i83,8} = 69,25 + i5797,06 \text{ Ом.}$$

Идентично, на основании схемы замещения, показанной на рис. 5, определяются сопротивления между линейными проводами и заземленными конструктивными элементами  $Z_{10} - Z_{15}$  и волновые сопротивления между линейными проводами в начале и в конце воздушной линии  $Z_4 - Z_7$  [11].

Расчет емкости между линейным проводом А и заземленными элементами на основной частоте 50 Гц производится по формуле

$$C_A = \frac{1}{X_C \cdot \omega} = \frac{1}{5797,0635 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,5493 \cdot 10^{-6}, \text{ Ф}$$

где  $X_{C1}$  – емкостное сопротивление линейного провода А,  $\omega = 2 \times \pi \times f$ .

Расчет индуктивности линейного провода А производится по формуле

$$L_A = \frac{X_L}{\omega} = \frac{382,047}{2 \times 3,14 \times 50} = 1,216, \text{ Гн}$$

где  $X_L$  – индуктивное сопротивление линейного провода А.

Расчет волновых сопротивлений между линейными проводами А–В, А–С, емкостей и индуктивностей линейных проводов производится аналогичным образом.

Полученные значения продольных и поперечных параметров, исследуемой модели ЛЭП сведены в табл. 4.

Таблица 4

Продольные и поперечные параметры линейного провода А

$Z_1$ , Ом	$\Psi Z_1$ , Град.	$Z_4$ , Ом	$\Psi Z_4$ , Град.	$Z_{14}$ , Ом	$\Psi Z_{14}$ , Град.
384,3271	83,757	375,2598	-17,23	3725,2	-89,51

На основании проведенных расчетов появляется возможность определить относительную погрешность емкости между фазой А и землей С14 исследуемой модели воздушной линии электропередачи:

$$\Delta_{CA} = \frac{0,58 - 0,5493}{0,58} \cdot 100 = 5,29, \%$$

а также относительную погрешность индуктивности линейного провода А:

$$\Delta_{LA} = \frac{1,216-1,2}{1,216} \cdot 100 = 1,3157, \%$$

На основании расчетов погрешности можно сделать выводы, что методика расчета имеет достаточно низкую погрешность вычислений, что позволяет с уверенностью утверждать о работоспособности представленной методики. Однако, для дальнейшего ее применения необходимо апробировать использованную методику на практике.

Численные значения продольных и поперечных параметров исследуемого восьмиполосника, полученные на основании предложенной методики, дают возможность достоверно установить количественную связь между входными и выходными характеристиками электрической энергии, каковыми являются напряжения и токи в начале и конце исследуемого участка ЛЭП.

#### **Заключение**

Рассмотренный вариант экспериментального определения численных значений продольных и поперечных параметров восьмиполосника представляет собой один из путей дальнейшего развития теории многополосников. Он позволяет сделать объективный анализ электротехнического оборудования, в частности участка линии электропередачи.

Разработанные в данном исследовании элементы теории и методика экспериментального определения искомых параметров восьмиполосника могут быть образцом для формирования подобных методик для десятиполосников, двенадцатиполосников, четырнадцатиполосников, которыми могут быть замещены, например, двухпроводные линии электропередачи, трехфазные линии электропередачи трехпроводного и четырехпроводного исполнений, трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом, пятипроводного и шестипроводного (двухцепная ЛЭП) исполнений. Возможна разработка подобных элементов теории многополосников и методик расчета их параметров иных исполнений.

Теория многополосников, в частности теория восьмиполосников, может оказать существенную помощь в определении параметров ЛЭП разной протяженности, степени технической сложности и уровня напряжения и будет полезна специалистам, занимающимся областью расчета электрических режимов по ЛЭП.

#### **Литература**

1. Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Изд-во МЭИ. 2007.
2. Булатников М.В. Определение начальных продольных параметров подземных и воздушных линий электропередачи на основе расчета электромагнитного поля // Электричество, №5, 2016. С. 17-24.
3. Бердин А.С., Коваленко П.Ю. Определение параметров схемы замещения двух смежных ЛЭП // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2014. № 2 (71). С. 29–34.
4. 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.
5. Christoph Braun, Mahbubur Rahman, Valentina Cecchi. A transmission line model with non-uniformly distributed line impedance // 2017 North American Power Symposium (NAPS), 2017. pp.187–201.
6. Chongyang Mao, Xiaobing Zou, Xinxin Wang. Analytical Solution of Nonuniform Transmission Lines for Z-Pinch // IEEE Transactions on Plasma Science. Vol. 42, №8, Aug. 2014. pp. 2092–2097.
7. José A. Brandão Faria, Rodolfo Araneo. Computation, Properties, and Realizability of the Characteristic Immittance Matrices of Nonuniform Multiconductor Transmission Lines // IEEE Transactions on Power Delivery. V.33. N.4. Aug. 2018. pp. 1885–1894.
8. Plotnikov M.P., Bolschanin G.A. Amplitude Values of the Incident and Reflected Waves in a Double-Circuit Power Transmission Line // IEEE Xplore 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). V.6. October 2018. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602612 - <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602612/authors#authors>.
9. Файбисович В. А. Определение параметров электрических систем: новые методы экспериментального определения, М., Энергоиздат, 1982. с. 120.
10. Bergeal J., Moller L. Analysis of the spectrum impedance of a network use of digital methods // Proc. Int. Conf. Electricity Distribution (CIRED). 1983.
11. Sana S., Aldeen M., Tan C. Fault detection in transmission network of power systems // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2011. № 33 (4). pp. 887-900
12. Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. № 5. С. 16-21



13. Большанин Г.А., Плотников М.П. Метод четырнадцатиполюсника для определения параметров однородного участка двухцепной линии электропередачи. Монография. Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2019. 176 с.

14. Большанин, Г.А, Большанина, Л.Ю. Способ определения первичных и обобщенных вторичных параметров однородного участка трехпроводной линии электропередачи методом восьмиполюсника Патент 2522829 Российской Федерации МПК G 01 R 27/02 №2013101260/28. 20.07.2014.

15. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Использование теории восьмиполюсника для анализа электропередачи // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken. 2014. 145 с.

16. Беляков Ю.С. Многополюсник как модель электрических систем. Ч.2. М: НТФ Энергопрогресс, 2013. 92 с.

17. Большанин Г.А. Передача электрической энергии пониженного качества по воздушным линиям электропередачи. Братск: Изд-во БрГУ, 2018. 223 с.

#### Авторы публикации

**Большанин Георгий Анатольевич** – канд. техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета.

**Плотников Михаил Павлович** – канд. техн. наук, доцент, кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета.

**Шевченко Михаил Алексеевич** – аспирант Братского государственного университета.

#### References

1. Ryzhov Yu P. *Long-range transmission of ultra-high voltage*. М.:MEI Publishing house. 2007.
2. Bulatnikov MV. The determination of initial longitudinal parameters of underground and overhead power lines based on calculation of electromagnetic field. *Electricity*. 2016;5:17-24.
3. Berdin AS., Kovalenko PYu. Determination of the parameters of the equivalent circuit of two adjacent power lines. *News of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System*. 2014;2 (71): 29–34.
4. Panova EA., Albrecht AYa. Refined specific electrical parameters of double-circuit 110 kV transmission lines for remote location of damage location. *Electrotechnical systems and complexes*. 2016;4 (33):35-40.
5. Christoph Braun, Mahbubur Rahman, Valentina Cecchi. *A transmission line model with non-uniformly distributed line impedance*. 2017 North American Power Symposium (NAPS), 2017. P.187–201.
6. Chongyang Mao, Xiaobing Zou, Xinxin Wang. Analytical Solution of Nonuniform Transmission Lines for Z-Pinch // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2014; 42(8):2092–2097.
7. José A. Brandão Faria, Rodolfo Araneo. Computation, Properties, and Realizability of the Characteristic Immittance Matrices of Nonuniform Multiconductor Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. pp. 1885–1894.
8. Plotnikov MP., Bolschanin GA. Amplitude Values of the Incident and Reflected Waves in a Double-Circuit Power Transmission Line. *IEEE Xplore 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2018. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602612 - <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602612/authors#authors>.
9. Faybisovich VA. *Determination of electrical systems parameters: New methods of experimental determination*. М. Энергоиздат. 1982. pp. 120
10. Bergeal J., Moller L. *Analysis of the spectrum impedance of a network use of digital methods*. *Proc. Int. Conf. Electricity Distribution (CIRED)*. 1983.
11. Sana S., Aldeen M., Tan C. Fault detection in transmission network of power systems. *Int. Journal Electric Power Energy Systems* 2011;33(4):887-900.
12. Kulikov AL., Lukicheva IA. Determination of the place of damage to the power line by the instantaneous values of the oscillograms of emergency events. *Vestnik IGEU*. 2016; 5:16-21.
13. Bolshaniin GA., Plotnikov MP. *The method of the fourteen-pole for determining the parameters of a homogeneous section of a two-chain transmission line*: Monograph. Novosibirsk: Ed. ANS "Sibak", 2019. 176 p.
14. Bolshaniin, GA, Bol'shanina, LYu. *Method for determining the primary and generalized secondary parameters of a homogeneous section of a three-wire transmission line using the eight-terminal method*. The applicant and the patent holder are the Fraternal State University. Patent 2522829 of the Russian Federation IPC G 01 R 27/02. №2013101260. 20.07.2014.

15. Bolshanin GA., Bolsanina LYu. *Using the theory of an eight-terminal network for analysis of power transmission*. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2014. P.145.

16. Belyakov YuS. *Multipolar As a model of electrical systems*. Pt 2. M.: NTF Energoprogress, 2013- P. 92.

17. Bol'shanin GA. *Transmission of low quality electrical energy via overhead power lines*. Bratsk: Publishing House of the BrSU, 2018.P. 223.

**Authors of the publication**

*Georgy A. Bolshanin* – Bratsk State University, Bratsk, Russia.

*Mikhail P. Plotnikov* – Bratsk State University, Bratsk, Russia.

*Mikhail Al. Shevchenko* – Bratsk State University, Bratsk, Russia.

*Поступила в редакцию*

*21 февраля 2019 г.*