

Информация об авторах

Подоплелов Евгений Викторович – к. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств», Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: uch_sovet@angtu.ru

Дементьев Анатолий Иванович – к. т. н., доцент, декан технологического факультета, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: andemtev@mail.ru

Антоненко Иван Юрьевич – магистрант, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск.

Корчевин Николай Алексеевич – д. х. н., профессор, профессор кафедры «Технология электрохимических производств», Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск.

Authors

Evgenii Viktorovich Podoplelov – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., head of the Subdepartment of Machines and Apparatus of Chemical Production, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: uch_sovet@angtu.ru

Anatolii Ivanovich Dement'ev – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., dean of the Technology Department, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: andemtev@mail.ru

Ivan Yur'evich Antonenko – Master's student, Angarsk State Technical University, Angarsk.

Nikolai Alekseevich Korchevin – Doctor of Chemical Science, Prof. of the Subdepartment of Electrochemical Production Technology, Angarsk State Technical University, Angarsk.

Для цитирования

Подоплелов Е. В. Новое высокоеффективное двойное сильфонное уплотнение штоков виброперемещивающих устройств / Е. В. Подоплелов, А. И. Дементьев, И. Ю. Антоненко, Н. А. Корчевин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 14–19. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).14–19

For citation

Podoplelov E. V., Dement'ev A. I., Antonenko I. Yu., Korchevin N. A. Novoe vysokoeffektivnoe dvoynoe sil'fonnoe uplotnenie shtokov vibroperemeshivayushchikh ustroistv [New high-performance double bellows seal for rods of vibration-mixing devices]. *Sovremennoye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 14–19, DOI: 10.26731/1813-9108.2019. 1(61).14–19

УДК 621.33

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).19–28

Г. А. Большанин

Братский государственный университет, г. Братск, Российская Федерация

Дата поступления: 05 апреля 2018 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация. Передача электрической энергии от места ее генерации до места потребления выполняется с помощью линий электропередачи разного исполнения различных классов напряжения. Оптимизация передачи электрической энергии предполагает, в первую очередь, повышение пропускной способности линий электропередач. Передача электрической энергии обеспечивается падающими и отраженными волнами электромагнитного поля. Их количество зависит от исполнения линии электропередачи. Электрическая энергия от источника потребителю доставляется падающими волнами электромагнитного поля, но потребляется только часть энергии, а другая часть отраженными волнами электромагнитного поля возвращается назад к источнику. Отраженные волны электромагнитного поля уменьшают пропускную способность линий электропередачи, снижают количество и качество электрической энергии. Оптимизация передачи электрической энергии в данном случае предполагает уменьшение амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля. Снижение амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля предполагает решение задачи минимизации функции по одной или нескольким переменным в зависимости от исполнения линий электропередач. Численные значения отраженных волн электромагнитного поля характеризуются соответствующими постоянными интегрирования, поэтому для достижения поставленной цели должны быть определены эти постоянные интегрирования. Для линий электропередач однопроводного исполнения задача минимизации амплитудного значения отраженной волны электромагнитного поля имеет однозначное решение. Здесь эта операция определяется как согласование электрической нагрузки с электрической сетью; для линий многопроводного исполнения поставленная задача имеет неоднозначные решения. Предлагается методика минимизации амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля в линиях электропередач однопроводного, двухпроводного и трехпроводного исполнений.

Ключевые слова: линия электропередачи, отраженная волна, падающая волна, постоянные интегрирования, волновые сопротивления, напряжение, ток, электромагнитное поле.

G. A. Bolshinin

Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation

Received: April 05, 2018

OPTIMIZATION OF TRANSFER OF ELECTRIC ENERGY



Abstract. Transmission of electrical energy from the place of its generation to the place of its consumption is carried out with the help of electric power transmission lines (EPTLs) of various designs of different voltage classes. Optimization of transmission of electrical energy assumes, first of all, increase of transmission capacity of the electric power lines. Transmission of electrical energy is provided by falling and reflected waves of the electromagnetic field. Their number depends on the performance of the transmission line. Electric energy from the source to the consumer is delivered by falling waves of the electromagnetic field. But only part of the energy is consumed, and the other part of it is reflected by the waves of the electromagnetic field back to the source. Reflected waves of the electromagnetic field reduce the transmission capacity of electric power lines, decrease the number and lower the quality of electrical energy. Optimizing the transmission of electrical energy in this case implies a decrease in the amplitude values of the reflected waves of the electromagnetic field. The problem of minimizing the amplitude values of the reflected waves of the electromagnetic field presupposes the solution of the task of minimizing the function in one or several variables, depending on the arrangement of the transmission line. The numerical values of the reflected waves of the electromagnetic field are characterized by the corresponding integration constants. Therefore, to solve the problem, these integration constants must be subjected to minimization.

For a single-wire electric power transmission line, the problem of minimizing the amplitude value of the reflected wave of an electromagnetic field has a unique solution. Here, this operation is defined as the coordination of the electric load with the electric network. As for multi-wire electric power transmission lines, this task has ambiguous solutions.

A technique is proposed for minimizing the amplitude values of the reflected electromagnetic field waves in a single-wire, two-wire and three-wire electric power transmission lines.

Keywords: electric power transmission line, reflected wave, incident wave, integration constants, wave impedances, voltage, current, electromagnetic field.

Введение

Передача электрической энергии напряжением 35 кВ и выше до отдаленного потребителя обычно выполняется линиями электропередачи (ЛЭП) трехпроводного исполнения. До менее отдаленных потребителей электрическая энергия может доставляться ЛЭП одно- и двухпроводного исполнения меньшего класса напряжения. В ЛЭП протяженностью свыше 200–300 км приходится учитывать волновой характер распределения электрической энергии по линейным проводам [1, 2]. При плохом качестве электрической энергии волновой характер ее распределения проявляется на менее протяженных ЛЭП [3–7].

Передача электрической энергии по ЛЭП однопроводного исполнения обеспечивается одной парой волн электромагнитного поля: падающей и отраженной; по ЛЭП двухпроводного исполнения – двумя парами волн электромагнитного поля, т. е. двумя падающими и двумя отраженными; по ЛЭП трехпроводного исполнения – тремя парами волн электромагнитного поля и т. д. [8]. Электрическая энергия от источника падающими волнами электромагнитного поля доставляется потребителю. Часть доставленной таким образом энергии действительно попадает в электрическую нагрузку, а другая часть отраженными волнами электромагнитного поля возвращается назад к месту генерации электрической энергии. Отраженные волны электромагнитного поля явно нежелательны, так как они заметно снижают пропускную способность ЛЭП и уменьшают качество электрической энергии [9]. Снижение амплитуды отраженных волн и является в данном случае предметом оптимизации передачи электрической энергии.

Методика исследования

Участие падающих и отраженных волн в передаче электрической энергии по ЛЭП подтверждается уравнениями распределения основных характеристик электрической энергии по токоведущим частям линий электропередачи, например, напряжения. Для ЛЭП однопроводного исполнения это уравнение имеет вид

$$\dot{U} = A_1 e^{\gamma l} + A_2 e^{-\gamma l}, \quad (1)$$

где \dot{U} – действующее значения напряжения в некоторой точке на однородном участке однопроводной ЛЭП, отстающей от начала анализируемого участка линии электропередачи на расстояние l ; A_1 и A_2 – постоянные интегрирования; γ – постоянная распространения электромагнитной волны электромагнитного поля по линейному проводу ЛЭП [1–4].

Уравнение (1) свидетельствует о том, что постоянная интегрирования A_1 несет ответственность за амплитуду отраженной волны электромагнитного поля, а постоянная интегрирования A_2 – за амплитуду падающей волны.

Распространение напряжения по линейным проводам ЛЭП двухпроводного исполнения описывается двумя уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{1}{2} (A_{11} e^{\gamma_1 l} + A_{12} e^{-\gamma_1 l} + A_{13} e^{\gamma_2 l} + A_{14} e^{-\gamma_2 l}); \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{2} (A_{21} e^{\gamma_1 l} + A_{22} e^{-\gamma_1 l} + A_{23} e^{\gamma_2 l} + A_{24} e^{-\gamma_2 l}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где A_{11} , A_{12} , A_{13} , A_{14} и A_{21} , A_{22} , A_{23} , A_{24} – постоянные интегрирования; γ_1 и γ_2 – постоянные распространения волн электромагнитного поля по токоведущим частям ЛЭП двухпроводного исполнения [3, 4].



Из уравнений (2) видно, что постоянные интегрирования A_{11} , A_{13} , A_{21} и A_{23} несут ответственность за амплитуды отраженных волн электромагнитного поля, а постоянные интегрирования A_{12} , A_{14} , A_{22} и A_{24} – за амплитуды падающих.

В ЛЭП трехпроводного исполнения фазные напряжения распространяются согласно уравнениям

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \frac{1}{3} \left(A_{A1} e^{\gamma_1 l} + A_{A2} e^{-\gamma_1 l} + A_{A3} e^{\gamma_2 l} + \right. \\ &\quad \left. + A_{A4} e^{-\gamma_2 l} + A_{A5} e^{\gamma_3 l} + A_{A6} e^{-\gamma_3 l} \right); \\ \dot{U}_B &= \frac{1}{3} \left(A_{B1} e^{\gamma_1 l} + A_{B2} e^{-\gamma_1 l} + A_{B3} e^{\gamma_2 l} + \right. \\ &\quad \left. + A_{B4} e^{-\gamma_2 l} + A_{B5} e^{\gamma_3 l} + A_{B6} e^{-\gamma_3 l} \right); \\ \dot{U}_{\bar{N}} &= \frac{1}{3} \left(A_{\bar{N}1} e^{\gamma_1 l} + A_{\bar{N}2} e^{-\gamma_1 l} + A_{\bar{N}3} e^{\gamma_2 l} + \right. \\ &\quad \left. + A_{\bar{N}4} e^{-\gamma_2 l} + A_{\bar{N}5} e^{\gamma_3 l} + A_{\bar{N}6} e^{-\gamma_3 l} \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где A_{A1} , A_{A2} , A_{A3} , A_{A4} , A_{A5} , A_{A6} , A_{B1} , A_{B2} , A_{B3} , A_{B4} , A_{B5} , A_{B6} , A_{C1} , A_{C2} , A_{C3} , A_{C4} , A_{C5} и A_{C6} – постоянные интегрирования; γ_1 , γ_2 и γ_3 – постоянные распространения волн электромагнитного поля по проводам однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения [4–6].

В уравнениях (3) постоянные интегрирования A_{A1} , A_{A3} , A_{A5} , A_{B1} , A_{B3} , A_{B5} , A_{C1} , A_{C3} и A_{C5} характеризуют амплитуды отраженных волн электромагнитного поля, а постоянные интегрирования A_{A2} , A_{A4} , A_{A6} , A_{B2} , A_{B4} , A_{B6} , A_{C2} , A_{C4} и A_{C6} – амплитуды падающих волн.

Численные значения постоянных распространения волн электромагнитного поля, входящие в состав уравнений (1) – (3), как и другие вторичные параметры ЛЭП, определяются из первичных параметров анализируемой ЛЭП [3–5, 10]. Первичные параметры можно определить из соответствующей справочной литературы [2, 11], аналитически [4, 11–26] или экспериментально [4, 27, 28].

Для определения численных значений постоянных интегрирования, кроме первичных параметров ЛЭП, необходимы сведения о входных или выходных напряжениях и токах [4].

Уменьшение амплитуд отраженных волн электромагнитного поля предполагает уменьшение численных значений постоянных интегрирования, ответственных за эти волны. Методику такого уменьшения следует рассмотреть для ЛЭП каждого исполнения отдельно.

ЛЭП однопроводного исполнения

Исключение отраженной волны электромагнитного поля в однородном участке ЛЭП однопроводного исполнения является достаточно известной операцией. В теоретической электротехнике называется согласованием электрической нагрузки с линией электропередачи.

Ответственность за присутствие и величину отраженной волны электромагнитного поля несет постоянная интегрирования A_1 . Ее отсутствие указывает на отсутствие отраженной волны. Она вычисляется по формуле

$$A_1 = \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 Z_{\bar{n}}}{2} e^{-\gamma_1 l},$$

где \dot{U}_2 и \dot{I}_2 – действующие значения напряжения и тока в конце рассматриваемого участка ЛЭП; Z_c – волновое сопротивление; l_{Σ} – протяженность всего рассматриваемого участка ЛЭП.

Постоянная интегрирования A_1 , судя по этой формуле, будет отсутствовать при условии $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_c$. Однако выходное напряжение \dot{U}_2 можно представить как произведение выходного тока \dot{I}_2 и сопротивления нагрузки Z_H : $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_H$. В таком случае постоянная интегрирования A_1 , а значит и отраженная волна электромагнитного поля будут отсутствовать при условии равенства сопротивления электрической нагрузки волновому сопротивлению анализируемого участка ЛЭП:

$$Z_H = Z_c. \quad (4)$$

Равенство (4) является условием согласования электрической нагрузки с однородным участком ЛЭП. При соблюдении этого условия в электрическую нагрузку поступает вся электрическая энергия, доставляемая падающей волной электромагнитного поля к концу анализируемого участка ЛЭП, но только этот участок должен быть абсолютно однородным. Это может быть только участок элементарной протяженности. Участок ЛЭП конечной протяженности может быть только относительно однородным с той или иной степенью допущения. Это значит, что после исключения отраженной волны электромагнитного поля на участке ЛЭП конечной протяженности поступление электрической энергии полностью невозможно. Речь может идти лишь об уменьшении ее амплитуды. Продуктивное использование согласования ЛЭП с электрической нагрузкой в качестве одного из способов повышения эффективности передачи электрической энергии возможно лишь при обеспечении хотя бы относительной однородности ЛЭП. Для ЛЭП однопроводного исполнения это вполне



осуществимо. Лишь в этом случае возможно уменьшение отраженной волны электромагнитного поля.

Для неоднородных участков ЛЭП условие (4) не имеет смысла. Да и само согласование неоднородного участка ЛЭП с электрической нагрузкой звучит абсурдно. Для оптимизации передачи электрической энергии по ЛЭП с явно выраженной неоднородностью пригодны лишь традиционные методы, предполагающие вмешательство в конструкцию ЛЭП: увеличение сечения линейного провода, расщепление линейного провода, включение батарей косинусных конденсаторов и т. п.

ЛЭП двухпроводного исполнения

Судя по уравнениям распространения напряжений по ЛЭП двухпроводного исполнения (2), ответственность за результирующие отраженные волны электромагнитного поля несут укрупненные постоянные интегрирования A_{11} , A_{13} , A_{21} и A_{23} . Их величины определяются по следующим формулам:

$$A_{11} = \frac{2a\dot{U}_{12} + 2b\dot{U}_{22} - \gamma_1^2 I_{12}^{(1)} Z_{1c1} - 2\gamma_2^2 \dot{U}_{12} +}{2(\gamma_1^2 - \gamma_2^2) e^{\gamma_1 l_\Sigma}} + \\ + \frac{\gamma_2^2 I_{12}^{(1)} Z_{1c1}}{+ 0}; \quad (5)$$

$$A_{13} = \frac{2\dot{U}_{12} - I_{12}^{(1)} Z_{1c1} - I_{12}^{(2)} Z_{1c2} - 2A_{11} e^{\gamma_1 l_\Sigma}}{2e^{\gamma_2 l_\Sigma}}; \quad (6)$$

$$A_{21} = \frac{2c\dot{U}_{12} + 2d\dot{U}_{22} - (\gamma_2^2 - \gamma_1^2) I_{22}^{(1)} Z_{2c1} - 2\gamma_2^2 \dot{U}_{22}}{2(\gamma_1^2 - \gamma_2^2) e^{\gamma_1 l_\Sigma}}; \quad (7)$$

$$A_{23} = \frac{2\dot{U}_{22} - I_{22}^{(1)} Z_{2c1} - I_{22}^{(2)} Z_{2c2} - 2A_{21} e^{\gamma_2 l_\Sigma}}{2e^{\gamma_2 l_\Sigma}}, \quad (8)$$

где

$$a = Z_{01} Y_{010} + Z_{01} Y_{012} - Z_{0M} Y_{012};$$

$$b = Z_{0M} Y_{020} + Z_{0M} Y_{012} - Z_{01} Y_{012};$$

$$c = Z_{0M} Y_{010} + Z_{0M} Y_{012} - Z_{02} Y_{012};$$

$$d = Z_{02} Y_{020} + Z_{02} Y_{012} - Z_{0M} Y_{012};$$

$$I_{12}^{(1)} = \frac{2\gamma_1 Z_{02} I_{12}}{(\gamma_1 + \gamma_2)(Z_{02} + Z_{0M})}; \quad I_{12}^{(2)} = \frac{\gamma_2 I_{12}^{(1)}}{\gamma_1};$$

$$I_{22}^{(1)} = \frac{2\gamma_1 Z_{01} I_{22}}{(\gamma_1 + \gamma_2)(Z_{01} + Z_{0M})}; \quad I_{22}^{(2)} = \frac{\gamma_2 I_{22}^{(1)}}{\gamma_1};$$

\dot{U}_{12} , I_{12} и \dot{U}_{22} , I_{12} – напряжения и токи в конце первого и второго провода двухпроводной ЛЭП; Z_{1c1} , Z_{1c2} , Z_{2c1} и Z_{2c2} – волновые сопротивления первого и второго провода от первой и второй пар волн электромагнитного поля; Z_{01} , Z_{02} , Z_{0M} и

Y_{010} , Y_{020} , Y_{012} – первичные параметры анализируемого участка двухпроводной ЛЭП.

Их величины зависят от постоянных распространения результирующих волн электромагнитного поля, волновых сопротивлений, первичных параметров анализируемой ЛЭП, напряжений и токов в конце линии электропередачи. Регулирование одной или нескольких из этих величин позволит минимизировать или даже исключить результирующие отраженные волны электромагнитного поля. Технически можно обеспечить регулирование любой из этих величин, но это потребует серьезных затрат. Наименьшие затраты будут при регулировании нагрузки, а именно, сопротивления нагрузки, что обеспечит изменение токов и напряжений в конце исследуемой ЛЭП.

Наиболее распространенная схема подключения электрической нагрузки к ЛЭП двухпроводного исполнения показана на рис. 1. Здесь видно, что каждый провод исследуемой ЛЭП имеет свою нагрузку $H1$ и $H2$. Именно сопротивления этих нагрузок Z_{1H} , Z_{2H} и подлежат регулированию с целью минимизации или исключения укрупненных постоянных интегрирования A_{11} , A_{13} , A_{21} и A_{23} .

Исключение результирующих отраженных волн электромагнитного поля в первом проводе ЛЭП двухпроводного исполнения возможно при соблюдении равенств $A_{11} = 0$ и $A_{13} = 0$. Иными словами, для получения ожидаемого эффекта от выполняемой оптимизации передачи электрической энергии по двухпроводной ЛЭП необходимо исключение из каждого провода линии обеих результирующих отраженных волн электромагнитного поля.

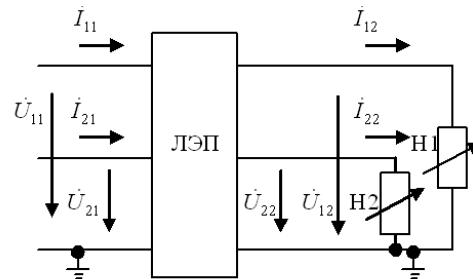


Рис. 1. Схема подключения электрических нагрузок к ЛЭП двухпроводного исполнения

Эти равенства с учетом формул (5) и (6) превращаются в уравнения

$$\frac{2a\dot{U}_{12} + 2b\dot{U}_{22} - \gamma_1^2 I_{12}^{(1)} Z_{1c1} - 2\gamma_2^2 \dot{U}_{12} + \gamma_2^2 I_{12}^{(1)} Z_{1c1}}{2(\gamma_1^2 - \gamma_2^2) e^{\gamma_1 l_\Sigma}} = 0;$$

$$\frac{2\dot{U}_{12} - I_{12}^{(1)}Z_{1c1} - I_{12}^{(2)}Z_{1c2} - 2A_{11}e^{\gamma_1 l_{\Sigma}}}{2e^{\gamma_2 l_{\Sigma}}} = 0.$$

С учетом равенств

$$\dot{U}_{12} = \dot{I}_{12}Z_{1H}; \quad \dot{U}_{22} = \dot{I}_{22}Z_{2H};$$

$$\dot{I}_{12}^{(1)} = \frac{2\gamma_1 \dot{I}_{12}}{\gamma_1 + \gamma_2}; \quad \dot{I}_{12}^{(2)} = \frac{2\gamma_2 \dot{I}_{12}}{\gamma_1 + \gamma_2}$$

совместное решение этих уравнений позволит определить формулы для вычисления сопротивлений нагрузок, при которых из первого провода ЛЭП двухпроводного исполнения результирующие отраженные волны электромагнитного поля полностью исключаются:

$$Z_{1H} = \frac{\gamma_1 Z_{1c1} + \gamma_2 Z_{1c2}}{\gamma_1 + \gamma_2}; \quad (9)$$

$$Z_{2H} = \frac{\dot{I}_{12}(\gamma_1^3 Z_{1c1} + \gamma_2^3 Z_{1c2}) - a\dot{I}_{12}(\gamma_1 Z_{1c1} + \gamma_2 Z_{1c2})}{b\dot{I}_{22}(\gamma_1 + \gamma_2)}. \quad (10)$$

Условие исключения результирующих отраженных волн электромагнитного поля во втором проводе ЛЭП двухпроводного исполнения выглядит следующим образом: $A_{21} = 0$; $A_{23} = 0$. Формулы (7) и (8) превращают эти равенства в уравнения:

$$\frac{2c\dot{U}_{12} + 2d\dot{U}_{22} - (\gamma_2^2 - \gamma_1^2)I_{22}^{(1)}Z_{2c1} - 2\gamma_2^2\dot{U}_{22}}{2(\gamma_1^2 - \gamma_2^2)} = 0;$$

$$\frac{2\dot{U}_{22} - I_{22}^{(1)}Z_{2c1} - I_{22}^{(2)}Z_{2c2} - 2B_{21}}{2} = 0.$$

С учетом равенств

$$\dot{U}_{12} = \dot{I}_{12}Z_{1H}; \quad \dot{U}_{22} = \dot{I}_{22}Z_{2H};$$

$$\dot{I}_{22}^{(1)} = \frac{2\gamma_1 \dot{I}_{22}}{\gamma_1 + \gamma_2}; \quad \dot{I}_{22}^{(2)} = \frac{2\gamma_2 \dot{I}_{22}}{\gamma_1 + \gamma_2}$$

совместное решение этих уравнений определит формулы для вычисления сопротивлений нагрузок при условии отсутствия результирующих отраженных волн электромагнитного поля во втором проводе ЛЭП двухпроводного исполнения:

$$Z_{1H} = \frac{\dot{I}_{22}(\gamma_1^3 Z_{2c1} + \gamma_2^3 Z_{2c2}) - d\dot{I}_{22}(\gamma_1 Z_{2c1} + \gamma_2 Z_{2c2})}{c\dot{I}_{12}(\gamma_1 + \gamma_2)}; \quad (11)$$

$$Z_{2H} = \frac{\gamma_1 Z_{2c1} + \gamma_2 Z_{2c2}}{\gamma_1 + \gamma_2}. \quad (12)$$

Формулы (9)–(12) свидетельствуют о различности условий минимизации результирующих отраженных волн электромагнитного поля в каждом проводе ЛЭП двухпроводного исполнения. Этот факт говорит о том, что полное исключение

результирующих отраженных волн электро-магнитного поля в проводах ЛЭП двухпроводного исполнения невозможно, но возможна их минимизация. Дело в том, что функции $A_{11}(Z_{1H}, Z_{2H})$, $A_{13}(Z_{1H}, Z_{2H})$, $A_{21}(Z_{1H}, Z_{2H})$ и $A_{23}(Z_{1H}, Z_{2H})$, в основном монотонные. Поэтому для оптимальной минимизации уровня результирующих отраженных волн электромагнитного поля в проводах ЛЭП двухпроводного исполнения достаточно определить соответствующие усредненные значения сопротивлений нагрузок.

Процесс оптимизации передачи электрической энергии существенно упрощается при полной симметрии системы электроснабжения, в состав которой входит анализируемая ЛЭП. В такой ЛЭП по всей ее протяженности неизменны продольные и поперечные параметры ($Z_1 = Z_2$, $Y_{10} = Y_{20}$), равновеликие сопротивления нагрузок ($Z_{1H} = Z_{2H} = Z_H$), одинаковые токи в обоих проводах. В этом случае передача электрической энергии по проводам ЛЭП обеспечивается падающими и отраженными волнами электромагнитного поля, характеризующимися одинаковыми постоянными распространения ($\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$). Это две равновеликие падающие и две равновеликие отраженные волны электромагнитного поля [2], но тогда и волновые сопротивления токоведущих частей ЛЭП тоже одинаковые – $Z_{1c1} = Z_{1c2} = Z_{2c1} = Z_{2c2} = Z_c$.

В таком случае условие отсутствия отраженных волн электромагнитного поля в симметричной ЛЭП, входящей в состав симметричной энергетической системы, т. е. условие согласования электрической нагрузки с линией электропередачи (как и в однопроводной ЛЭП) заключается в равенстве волнового сопротивления и сопротивления электрической нагрузки (4): $Z_c = Z_H$. При соблюдении этого условия вся электрическая энергия, транспортируемая падающими волнами электромагнитного поля в конец анализируемой ЛЭП, поступает в электрическую нагрузку, но лишь при абсолютной симметрии всей электроэнергетической системы. Однако абсолютная симметрия электроэнергетической системы, в принципе, невозможна. Возможна лишь относительная симметрия, но тогда и речи о полном исключении отраженных волн электромагнитного поля из токоведущих частей ЛЭП двухпроводного исполнения быть не может. Можно говорить лишь об уменьшении уровня отраженных волн.

ЛЭП трехпроводного исполнения

Ответственность за отраженные волны электромагнитного поля в линейных проводах ЛЭП трехпроводного исполнения несет постоянные



интегрирования A_{A1} , A_{A3} , A_{A5} , A_{B1} , A_{B3} , A_{B5} , A_{C1} , A_{C3} и A_{C5} . Именно их нужно минимизировать для того, чтобы сократить амплитуды отраженных волн электромагнитного поля и, таким образом, увеличить пропускную способность ЛЭП.

Для того, чтобы минимизировать постоянные интегрирования, отвечающие за результирующие отраженные волны электромагнитного поля, необходимо обеспечить регулирование хотя бы одной из величин, от которой зависит величина этих постоянных интегрирования. В данном случае удобнее всего регулировать нагрузку, а именно, сопротивление нагрузки. От него зависят напряжения и токи в конце линии электропередачи. В таком случае интерес представляет вариант прогнозирования напряжений и токов при известных основных характеристиках электрической энергии в конце анализируемой ЛЭП.

Величины подлежащих минимизации постоянных интегрирования определяются следующим образом:

$$A_{A1} = \frac{3G - 3D(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 3\gamma_2^2\gamma_3^2\dot{U}_{2A} - a\gamma_2^2\gamma_3^2 +}{[2\gamma_1^4 - 2\gamma_1(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 2\gamma_2^2\gamma_3^2]e^{\gamma_1 l_\Sigma}} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{+d(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) - h}{+0}; \quad (13)$$

$$A_{A3} = \frac{3D - 2A_{A1}e^{\gamma_1 l_\Sigma}(\gamma_1 - \gamma_3^2) - 3\gamma_3^2\dot{U}_{2A} + a\gamma_3^2 - d}{2e^{\gamma_2 l_\Sigma}(\gamma_2^2 - \gamma_3^2)}; \quad (14)$$

$$A_{A5} = \frac{3\dot{U}_{2A} - a - 2A_{A1}e^{\gamma_1 l_\Sigma} - 2A_{A3}e^{\gamma_2 l_\Sigma}}{2e^{\gamma_3 l_\Sigma}}; \quad (15)$$

$$A_{B1} = \frac{3H - 3E(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 3\gamma_2^2\gamma_3^2\dot{U}_{2B} - b\gamma_2^2\gamma_3^2 +}{[2\gamma_1^4 - 2\gamma_1(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 2\gamma_2^2\gamma_3^2]e^{\gamma_1 l_\Sigma}} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{+f(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) - k}{+0}; \quad (16)$$

$$A_{B3} = \frac{3E - 2A_{B1}e^{\gamma_1 l_\Sigma}(\gamma_1 - \gamma_3^2) - 3\gamma_3^2\dot{U}_{2B} + b\gamma_3^2 - f}{2e^{\gamma_2 l_\Sigma}(\gamma_2^2 - \gamma_3^2)}; \quad (17)$$

$$A_{B5} = \frac{3\dot{U}_{2B} - b - 2A_{B1}e^{\gamma_1 l_\Sigma} - 2A_{B3}e^{\gamma_2 l_\Sigma}}{2e^{\gamma_3 l_\Sigma}}; \quad (18)$$

$$A_{C1} = \frac{3J - 3F(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 3\gamma_2^2\gamma_3^2\dot{U}_{2C} - c\gamma_2^2\gamma_3^2 +}{[2\gamma_1^4 - 2\gamma_1(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) + 2\gamma_2^2\gamma_3^2]e^{\gamma_1 l_\Sigma}} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{+g(\gamma_2^2 + \gamma_3^2) - m}{+0}; \quad (19)$$

$$A_{C3} = \frac{3F - 2A_{C1}e^{\gamma_1 l_\Sigma}(\gamma_1 - \gamma_3^2) - 3\gamma_3^2\dot{U}_{2C} + c\gamma_3^2 - g}{2e^{\gamma_2 l_\Sigma}(\gamma_2^2 - \gamma_3^2)}; \quad (20)$$

$$A_{C5} = \frac{3\dot{U}_{2C} - c - 2A_{C1}e^{\gamma_1 l_\Sigma} - 2A_{C3}e^{\gamma_2 l_\Sigma}}{2e^{\gamma_3 l_\Sigma}}, \quad (21)$$

где

$$D = (\underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0A0} + \underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0AB} + \underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0CA} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0CA})\dot{U}_{2A} - \\ - (\underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0B0} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0BC} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} + \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0BC})\dot{U}_{2B} - \\ - (\underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0C0} - \\ - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0BC})\dot{U}_{2C};$$

$$E = (\underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0B0} + \underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0BC} + \underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0AB} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0BC})\dot{U}_{2B} - \\ - (\underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0A0} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0CA})\dot{U}_{2A} - \\ - (\underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0BC} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0CO} - \\ - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0BC})\dot{U}_{2C};$$

$$F = (\underline{Z}_{0N}\underline{Y}_{0N0} + \underline{Z}_{0N}\underline{Y}_{0NA} + \underline{Z}_{0N}\underline{Y}_{0BC} - \\ - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0BC})\dot{U}_{2C} - \\ - (\underline{Z}_{0C}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0A0} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0AB})\dot{U}_{2A} - \\ - (\underline{Z}_{0C}\underline{Y}_{0BC} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0B0} - \\ - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0BC} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0AB})\dot{U}_{2B};$$

$$G = (\underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0A0} + \underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0AB} + \underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0CA} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0CA})D - \\ - (\underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0B0} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0BC} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} + \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0BC})E - \\ - (\underline{Z}_{0A}\underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0C0} - \\ - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0BC})F;$$

$$H = (\underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0B0} + \underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0BC} + \underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0AB} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0BC})E - \\ - (\underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0A0} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0CA})D - \\ - (\underline{Z}_{0B}\underline{Y}_{0BC} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0C0} - \\ - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0BC})F;$$

$$J = (\underline{Z}_{0N}\underline{Y}_{0N0} + \underline{Z}_{0N}\underline{Y}_{0NA} + \underline{Z}_{0N}\underline{Y}_{0BC} - \\ - \underline{Z}_{0CA}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0BC})F - \\ - (\underline{Z}_{0C}\underline{Y}_{0CA} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0A0} - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \\ - \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0CA} + \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0AB})D - \\ - (\underline{Z}_{0C}\underline{Y}_{0BC} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Y}_{0AB} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0B0} - \\ - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0BC} - \underline{Z}_{0BC}\underline{Y}_{0AB})E;$$

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{3\Delta i_{2A} +}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(\underline{Z}_{0B}\underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0BC}^2 + \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0BC} - \\ &\quad + 0)} \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B})}{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC}}; \\
 b &= \frac{3\Delta i_{2B} +}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(\underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0BC}^2 + \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0BC} - \\ &\quad + 0)} \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC})}{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC}}; \\
 c &= \frac{3\Delta i_{2C} +}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(\underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0B} - \underline{Z}_{0AB}^2 + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0BC} - \\ &\quad + 0)} \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{-\underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC})}{-\underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC}}; \\
 d &= \frac{3\Delta i_{2A}(\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2) +}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(\underline{Z}_{0B}\underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0BC}^2 + \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0BC} - \\ &\quad + 0)} \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B})}{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B}}; \\
 f &= \frac{3\Delta i_{2B}(\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2) +}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(\underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0CA}^2 + \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0BC} - \\ &\quad + 0)} \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC})}{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC}}; \\
 g &= \frac{3\Delta i_{2C}(\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2) +}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(\underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0B} - \underline{Z}_{0AB}^2 + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0BC} - \\ &\quad + 0)} \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{-\underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC})}{-\underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC}}; \\
 h &= \frac{3\Delta i_{2A}(\gamma_1^4 + \gamma_2^4 + \gamma_3^4) +}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(\underline{Z}_{0B}\underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0BC}^2 + \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0BC} - \\ &\quad + 0)} \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B})}{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0BC} - \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B}}; \\
 k &= \frac{3\Delta i_{2B}(\gamma_1^4 + \gamma_2^4 + \gamma_3^4) +}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(\underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0CA}^2 + \underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0BC} - \\ &\quad + 0)} \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC})}{-\underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0C} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC}}; \\
 m &= \frac{3\Delta i_{21C}(\gamma_1^4 + \gamma_2^4 + \gamma_3^4) +}{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)(\underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0B} - \underline{Z}_{0AB}^2 + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0BC} - \\ &\quad + 0)} \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{-\underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC})}{-\underline{Z}_{0CA}\underline{Z}_{0B} + \underline{Z}_{0AB}\underline{Z}_{0CA} - \underline{Z}_{0A}\underline{Z}_{0BC}}; \\
 \Delta &= (\underline{Z}_{0B}\underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0BC}^2)(\gamma_1 Z_{cA1} + \gamma_2 Z_{cA2} + \gamma_3 Z_{cA3}).
 \end{aligned}$$

В этих равенствах участвуют не только постоянные распределения волн электро-

магнитного поля и первичные параметры анализируемой ЛЭП, но и фазные напряжения, и линейные токи в конце линии электропередачи. Фазные напряжения в конце ЛЭП можно представить как произведения линейных токов в конце ЛЭП и сопротивлений фаз нагрузки:

$\dot{U}_{2A} = \dot{I}_{2A}\underline{Z}_{HA}$; $\dot{U}_{2B} = \dot{I}_{2B}\underline{Z}_{HB}$; $\dot{U}_{2C} = \dot{I}_{2C}\underline{Z}_{HC}$, где \underline{Z}_{HA} , \underline{Z}_{HB} и \underline{Z}_{HC} – полные сопротивления фаз нагрузок.

Если эти равенства учесть в формулах (13) – (21), то окажется, что постоянные интегрирования A_{A1} , A_{A3} , A_{A5} , A_{B1} , A_{B3} , A_{B5} , A_{C1} , A_{C3} и A_{C5} являются функциями по фазным сопротивлениям нагрузки. Тем более, что фазные сопротивления нагрузки входят в состав коэффициентов D , E , F , G , H и J , участвующих в этих формулах.

Для реализации оптимизации передачи электрической энергии, т. е. для повышения пропускной способности трехфазной линии электропередачи трехпроводного исполнения в результате сокращения амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля достаточно выполнить задачу минимизации функций $A_{A1}(\underline{Z}_{HA}, \underline{Z}_{HB}, \underline{Z}_{HC})$, $A_{A3}(\underline{Z}_{HA}, \underline{Z}_{HB}, \underline{Z}_{HC})$, $A_{A5}(\underline{Z}_{HA}, \underline{Z}_{HB}, \underline{Z}_{HC})$, $A_{B1}(\underline{Z}_{HA}, \underline{Z}_{HB}, \underline{Z}_{HC})$, $A_{B3}(\underline{Z}_{HA}, \underline{Z}_{HB}, \underline{Z}_{HC})$, $A_{B5}(\underline{Z}_{HA}, \underline{Z}_{HB}, \underline{Z}_{HC})$, $A_{C1}(\underline{Z}_{HA}, \underline{Z}_{HB}, \underline{Z}_{HC})$, $A_{C3}(\underline{Z}_{HA}, \underline{Z}_{HB}, \underline{Z}_{HC})$ и $A_{C5}(\underline{Z}_{HA}, \underline{Z}_{HB}, \underline{Z}_{HC})$.

Задача минимизации функции по многим переменным решается симплекс-методом Нелдера-Мида, методом Квайна, с помощью карт Вейча и т. п. Однако, так или иначе, это достаточно серьезная задача, и она требует отдельного исследования.

Результаты

Разработана методика оптимизации передачи электрической энергии по ЛЭП однопроводного, двухпроводного и трехпроводного исполнений понижением уровня амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля. Минимизация уровня отраженных волн электромагнитного поля есть действенный способ повышения эффективности передачи электрической энергии. Он вполне может быть реализован в практике электроснабжения промышленных и иных объектов наряду с традиционными методами повышения эффективности передачи электрической энергии и пропускной способности ЛЭП.

Заключение

Выполненное исследование наметило пути оптимизации передачи электрической энергии путем сокращения амплитуд отраженных волн электромагнитного поля. Объектом управления для



достижения желаемого результата избрана электрическая нагрузка.

Для ЛЭП однопроводного исполнения задача сокращения амплитуды отраженной волны электромагнитного поля решается однозначно. Минимизация функции по одной переменной, в принципе, может быть выполнена достаточно точно, и амплитуда отраженной волны электромагнитного поля может быть сокращена до нуля.

В идеале возможна абсолютная минимизация амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля и в ЛЭП двухпроводного исполнения. В статье показаны формулы для вычисления сопротивлений электрических нагрузок, которые должны быть установлены для достижения такой

минимизации. Однако на практике абсолютное выполнение условий минимизации амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля может оказаться трудно достижимым. В таком случае речь должна идти об относительной, но не абсолютной минимизации этих амплитуд.

В ЛЭП с тремя и более линейными проводами уменьшение амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля сопряжено с минимизацией функций по нескольким переменным. В этом случае пути оптимизации передачи электрической энергии только обозначены. Поиск вариантов решения поставленной задачи в каждом отдельном случае требует отдельного исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения М. : Изд-во МЭИ, 2007. 488 с.
2. Электротехнический справочник. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. М. : Изд-во МЭИ, 2004. 964 с.
3. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем : в 2 кн. Братск : Изд-во БрГУ, 2006. 807 с.
4. Большанин, Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнений. Братск : Изд-во БрГУ, 2016. 313 с.
5. Большанин, Г.А., Большанина Л.Ю. Прогнозирование напряжений и токов на однородном участке трехпроводной ЛЭП. Братск : Изд-во БрГУ, 2014. 138 с.
6. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по линиям электропередачи. Братск : Изд-во БрГУ, 2011. 64 с.
7. 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.
8. Костенко М.В., Перельман А.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М. : Энергия, 1973. 272 с.
9. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Отраженная волна и качество электрической энергии // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Тольятти, 2009. Ч. 2. С. 101–105.
10. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по однородному трехфазному трехпроводному участку воздушной ЛЭП // Науч. вестн. НГТУ. 2009. № 4(37). С.135–144.
11. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / под общ. ред. С.И. Гамазина, Б.И. Кудрина, С.А. Цырука. М. : Изд-во МЭИ, 2010. 745 с.
12. Мюльбаэр А.А. Особенности расчета наведенного напряжения на отключенной цепи двухцепной воздушной линии электропередачи // Науч. вестн. НГТУ. 2016. Т. 64. №3. С. 146–160.
13. Гасаненко Л.Б. Импеданс поля низкочастотного прямолинейного тока, приподнятого над горизонтально-слоистой землей // Электромагнитное зондирование и магнитотеллурические методы разведки. Л. : Изд-во ЛГУ, 1968. С. 47–58.
14. Костиков В.У., Пучков Г.Г. Алгоритм и программа расчета на ЭЦВМ коэффициента взаимоиндукции провод – диполь на поверхности горизонтально-слоистой земли // Влияние внешних электромагнитных полей на линии связи. Эксплуатационные показатели связи. Омск, 1973. С. 18–24.
15. 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.
16. Fault location system on double circuit twoterminal transmission lines based on ANNs / I. Zamora, J. Gracia, K. Sagastabeitia, P. Eguia, F. Jurado, et. al. // Proceeding of 2001 IEEE Porto Power Tech Porto. 2001. Vol. 3. P. 5.
17. Определение первичных продольных параметров воздушных и подземных линий электропередачи на основе расчета электромагнитного поля / М.В. Булатников и др. // Электричество. 2016. № 5. С. 17–24.
18. Костенко М.В. Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // Электричество. 1955. № 10. С. 29–44.
19. Гасаненко Л.Б. Импеданс поля низкочастотного прямолинейного тока над горизонтально слоистой землей // Электромагнитное зондирование и магнитотеллурические методы разведки. Л. : Изд-во ЛГУ, 1968. С. 47–58.
20. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
21. Шелюк С.Н., Суворов А.А. Определение параметров схемы замещения ЛЭП с учетом поперечной проводимости // Энергетика: экология, надежность, безопасность : материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Томск, 2000. Т. 1. С. 39–41.
22. Duggan Eammon, Morisson Robert. New technique is developed to determine harmonic impedance // Transmiss and Distrieb. Int., 1992. № 2. Р. 32–34.
23. Файбисович В.А. Определение параметров электрических систем: Новые методы экспериментального определения. М. : Энергоиздат, 1982. 120 с.

24. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушной линии электропередачи 330-500кВ. М. : Энергия, 1974. 474 с.
25. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Параметры трехпроводной ЛЭП. Метод восьмиполосника. Братск : Изд-во БрГУ, 2013. 265 с.
26. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Использование теории восьмиполосника для анализа электропередачи // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2014. 145 с.
27. Кротков И.Н. Точные измерения электрической емкости и индуктивности. Схемы, методы, эталоны. М. : Стандартиздат, 1966. 272 с.
28. Пат. 2522829 Рос. Федерации. Способ определения первичных и обобщенных вторичных параметров однородного участка трехпроводной линии электропередачи методом восьмиполосника. № 2013101260/28 ; заявл. 10.01.2013 ; опубл. 20.07.2014.

REFERENCES

1. Ryzhov Yu.P. Dal'nie elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya [Long-distance power transmission of extra-high voltage]. Moscow: MEI Publ., 2007, 488 p.
2. Elektrotehnicheskii spravochnik v 4-kh t. T.3, Proizvodstvo, peredacha i raspredelenie elektricheskoi energii [Electrotechnical reference book in 4 vols. Vol.3, Production, transmission and distribution of electrical energy]. In MEI Prof. Gerasimov V.G. et al. (gen. ed.). 9th ed., ster. Moscow: MEI Publ., 2004, 964 p.
3. Bol'shanin G.A. Raspredelenie elektricheskoi energii ponizhennogo kachestva po uchastkam elektroenergeticheskikh sistem. V 2-kh kn. [Distribution of low-quality electrical energy in areas of electrical power systems. In 2 books]. Bratsk: BrGU, 2006, 807 p.
4. Bol'shanin, G.A. Peredacha elektricheskoi energii po LEP odno-, dvukh- i trekhprovodnogo ispolnenii [Transmission of electrical energy through electric power transmission lines of one-, two- and three-wire versions]. Bratsk: BrGU Publ., 2016, 313 p.
5. Bol'shanin, G.A., Bol'shanina L.Yu. Prognozirovaniye napryazhenii i tokov na odnorodnom uchastke trekhprovodnoi LEP [Prediction of voltages and currents in a homogeneous section of a three-wire electric power transmission line]. Bratsk: FGBOU VPO "BrGU" Publ., 2014, 138 p.
6. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Osobennosti rasprostraneniya elektricheskoi energii po liniyam elektroperedachi [Features of the distribution of electrical energy through power lines]. Bratsk: BrGU Publ., 2011, 64 p.
7. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. K voprosu o volnovoi teorii peredachi elektricheskoi energii po liniyam elektroperedachi [On the question of the wave theory of transmission of electric energy via power lines]. Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies], 2010. No. 3 (7), pp. 71 – 76.
8. Kostenko M.V., Perel'man A.S., Shkarin Yu.P. Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprivodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya [Wave processes and electrical noise in multi-voltage high-voltage lines]. Moscow: Energiya Publ., 1973, 272 p.
9. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Otrazhennaya volna i kachestvo elektricheskoi energii [Reflected wave and quality of electrical energy]. Problemy elektrotekhniki, elektroenergetiki i elektrotehnologii: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Tol'yatti, 12-15 maya 2009 g. [Problems of electrical engineering, power engineering and electrical technology: a collection of works of the International Scientific and Technical Conference. Tol'yatti, May 12-15, 2009]. In 3 parts. Tol'yatti: TGU Publ., 2009. Part 2, pp. 101 – 105.
10. Bol'shanin G.A. Raspredelenie elektricheskoi energii ponizhennogo kachestva po odnorodnomu trekhfaznomu trekhpro-vodnomu uchastku vozдушnoi LEP [Distribution of low-quality electrical energy along a homogeneous three-phase three-conductor section of aerial electric power transmission lines]. Nauchnyi vestnik NGTU [Scientific Herald of the NSTU], 2009. No. 4(37), pp.135-144.
11. Spravochnik po elektrosnabzheniyu i elektrooborudovaniyu promyshlennykh predpriyatiy i obshchestvennykh zdanii [Handbook of power supply and electrical equipment of industrial enterprises and public buildings]. In MEI Profs. Gamazin S.I., Kudrin B.I., Tsyruk S.A. (gen. ed.). Moscow: MEI Publ., 2010, 745 p.
12. Myul'baer A.A. Osobennosti rascheta navedennogo napryazheniya na otklyuchennoi tsepi dvukhtsepnoi vozduшnoi linii elektroperedachi [Features of the calculation of the induced voltage on the disconnected circuit of a double-circuit overhead electric power transmission line]. Nauchnyi vestnik NGTU [Scientific Herald of the NSTU], 2016. Vol. 64, No.3, pp. 146 – 160.
13. Gasanenko L.B. Impedans polya nizkochastotnogo pryamolineinogo toka, pripodnyatogo nad gorizontall'no-sloistoi zemlei [The impedance of the field of low-frequency linear current raised above a horizontally layered ground]. Elektromagnitnoe zondirovaniye i magnetotelluricheskie metody razvedki [Electromagnetic sounding and magnetotelluric methods of reconnaissance]. Leningrad: LGU Publ., 1968, pp. 47 – 58.
14. Kostikov V.U., Puchkov G.G. Algoritm i programma rascheta na ETsVM koeffitsienta vzaimoinduktsii provod – dipol' na pov-erkhnosti gorizontall'no-sloistoi zemli [Algorithm and program for calculating the mutual induction of the wire - dipole coefficient on the surface of a horizontally-layered ground on a digital computer]. Vliyanie vneshnikh elektromagnitnykh polei na liniyu svyazi. Ekspluatatsionnye pokazateli svyazi [Influence of external electromagnetic fields on communication lines. Operational indicators of communication]. Omsk, 1973, pp. 18 – 24.
15. Panova E.A., Al'brekht A.Ya. Utochnennyye udel'nye elektricheskie parametry dvukhtsepnykh LEP 110 kV dlya distantsion-nogo opredeleniya mesta povrezhdeniya [Refined specific electrical parameters of double-circuit 110 kV electric power transmission lines for remote determination of the damage location]. Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy [Electrotechnical systems and complexes], 2016. No.4 (33), pp. 35 – 40.
16. Mazon A., Zamera I., Gracia J., Sagastabeitia K., Eguia P., Jurado F., et. al. Fault location system on double circuit twoterminal transmission lines based on ANNs. Proceeding of 2001 IEEE Porto Power Tech Porto. Vol. 3, 2001, p. 5.
17. Bulatnikov M.V., Kadomskaya K.P., Kandakov S.A., Lavrov Yu.A. Opredelenie pervichnykh prodol'nykh parametrov vozduшnykh i podzemnykh liniy elektroperedachi na osnove rascheta elektromagnitnogo polya [Determination of the primary longitudinal parameters of overhead and underground power lines based on the calculation of the electromagnetic field]. Elektrичество [Electricity], 2016. No.5, pp. 17 – 24.
18. Kostenko M.V. Vzaimnye soprotivleniya mezhdu vozduшnymi liniyami s uchetom poverkhnostnogo effekta v zemle [Mutual resistance between the air lines with the surface effect in the ground]. Elektrичество [Electricity], 1955, No.10, pp. 29 – 44.



19. Gasanenko L.B. Impedans polya nizkochastotnogo pryamolineinogo toka nad gorizonta'no sloistoi zemlei [The impedance of the field of low-frequency straight current over a horizontally layered ground]. Elektromagnitnoe zondirovanie i magnitetelluricheskie metody razvedki [Electromagnetic sounding and magnetotelluric methods of reconnaissance]. Leningrad: LGU Publ., 1968, pp. 47 – 58.
20. Kalantarov P.L., Tseitin L.A. Raschet induktivnostei: Spravochnaya kniga [Calculation of inductances: Reference book]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986, 488 p.
21. Shelyuk S.N., Suvorov A.A. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya LEP s uchetom poperechnoi provodimosti [Determination of the parameters for the replacement of power lines with regard to the transverse conductivity]. Materialy shesto Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii «Energetika: ekologiya, nadezhnost', bezopasnost'» [Materials of the sixth All-Russian Scientific-Technical Conference "Energy: Ecology, Reliability, Safety"]. Tomsk: TPU Publ., 2000. Vol. 1, pp. 39 – 41.
22. Duggan E., Morisson R. New technique is developed to determine harmonic impedance. Transmiss and Distrieb. Int., 1992. 3, No.2, p. 32, 34.
23. Faibisovich V.A. Opredelenie parametrov elektricheskikh sistem: Novye metody eksperimental'nogo opredeleniya [Determination of parameters of electrical systems: New methods for experimental determination]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982, 120 p.
24. Mel'nikov N.A., Rokotyan S.S., Sherentsis A.N. Proektirovaniye elektricheskoi chasti vozdushnoi linii elektroperedachi 330-500kV [Designing the electrical part of the overhead 330-500kV power transmission line]. In Rokotyan S.S. (gen. ed.). 2nd ed., updated and revised. Moscow: Energiya Publ., 1974, 474 p.
25. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Parametry trekhprovodnoi LEP. Metod vos'mipolyusnika [Parameters of three-wire power lines. The eight-terminal network method]. Bratsk: BrGU Publ., 2013, 265 p.
26. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Ispol'zovanie teorii vos'mipolyusnika dlya analiza elektroperedachi [Using the eight-terminal network theory for electric power transmission analysis]. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2014, 145 p.
27. Krotkov I.N. Tochnye izmereniya elektricheskoi emkosti i induktivnosti. Skhemy, metody, etalony [Accurate measurements of electrical capacitance and inductance. Schemes, methods, standards]. Moscow: Standartizdat Publ., 1966, 272 p.
28. Bol'shanin G.A., Bol'shanina, L.Yu. Sposob opredeleniya pervichnykh i obobshchennykh vtorichnykh parametrov odnorodnogo uchastka trekhprovodnoi linii elektroperedachi metodom vos'mipolyusnika [The method of determining the primary and generalized secondary parameters of a homogeneous section of a three-wire transmission line by the method of an eight-terminal network]. Patent RF 2522829 MPK G 01 R 27/02. Applicant and patent holder is Bratsk state university. No.2013101260/28; pending 10.01.2013; publ. 20.07.2014.

Информация об авторах

Большанин Георгий Анатольевич – к. т. н., доцент, Братский государственный университет, г. Братск, e-mail: bolshaning@mail.ru

Authors

Georgii Anatol'evich Bol'shanin – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Prof. of the Subdepartment of Electric Power Engineering and Electric Engineering, Bratsk State University, Bratsk, e-mail: bolshaning@mail.ru

Для цитирования

Большанин Г.А. Оптимизация передачи электрической энергии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. – Т. 61, № 1. – С. 19–28. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).19–28

For citation

Bol'shanin G.A. Optimizatsiya peredachi elektricheskoi energii [Optimization of transfer of electric energy]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 19–28, DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).19–28

УДК 519.6:311

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).28–34

Ю. М. Краковский¹, Н. А. Хоанг²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 14 ноября 2018 г.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПО ДАННЫМ МАЛОГО ОБЪЕМА

Аннотация. При эксплуатации любого сложного технологического оборудования происходит воздействие на него различных случайных факторов. Это, в свою очередь, приводит к нарушению производственных процессов, участником которых является это оборудование. Учитывая случайный характер воздействий, влияющих на эксплуатируемое оборудование, наработка принимает случайные значения. При этом она описывается функцией распределения или плотностью распределения вероятностей, а также различными числовыми характеристиками, например: дисперсией, средне квадратическим значением, матожиданием и др. При небольшом объеме экспериментальных данных по наработкам оборудования, что и наблюдается на практике, предлагается построить эмпирическую функцию распределения и, используя результаты имитационного моделирования, оценить показатели надежности по предложенным численным моделям. На практике такими показателями