

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES

05.14.02 Электростанции и электроэнергетические системы

Научная статья

УДК 621.317

<http://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.4.1>

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Роман Евгеньевич Бережной^{1*}, Владимир Михайлович Кожевников²,
Денис Васильевич Петров³

^{1, 2, 3} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, 355017, Ставрополь, Российская Федерация)

¹ [bereznoy-roman00@mail.ru](mailto:berezhnoy-roman00@mail.ru)

² vkozhevnikov@ncfu.ru

³ dpetrov@ncfu.ru

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. В данной статье предлагается использование частотного анализа (мониторинга) для решения задачи определения актуальных погонных параметров линии электропередачи, а также определения места повреждения на ней (оценивание состояния линии электропередачи). **Материалы и методы.** В основу предлагаемого метода заложен подход к линиям электропередачи как к линиям с распределёнными параметрами с использованием решений волновых уравнений и выражений вторичных параметров линии. **Результаты и обсуждение.** Практической реализацией одной из задач частотного метода в данной статье является определение места повреждения на модели длинной линии в программе Multisim. **Заключение.** В рамках данной статьи предложен метод оценивания состояния линии электропередачи с помощью частотного анализа.

Ключевые слова: длинная линия электропередачи, спектральный мониторинг, погонные параметры
Для цитирования: Бережной Р. Е., Кожевников В. М., Петров Д. В. Частотный метод оценивания состояния линии электропередач // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2023. № 4 (97). С. 7–13. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.4.1>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.05.2023;

одобрена после рецензирования 02.06.2023;

принята к публикации 09.06.2023.

Research article

FREQUENCY METHOD OF ASSESSING THE CONDITION OF THE POWER LINE

Roman E. Berezhnoy^{1*}, Vladimir M. Kozhevnikov², Denis V. Petrov³

^{1, 2, 3} North Caucasus Federal University (1, Pushkin st., 355017, Stavropol, Russian Federation)

¹ [bereznoy-roman00@mail.ru](mailto:berezhnoy-roman00@mail.ru)

² vkozhevnikov@ncfu.ru

³ dpetrov@ncfu.ru

* Corresponding author

Abstract. Introduction. This article proposes the use of frequency analysis (monitoring) to solve the problem of determining the actual linear parameters of the power line, as well as determining the location of damage on it (assessing the condition of the power line). **Materials and methods.** The proposed method is based on an approach to power transmission lines as lines with distributed parameters using solutions of wave equations and expressions of secondary line parameters. **Results and discussion.** The practical implementation of one of the tasks of the frequency method in this article is to determine the location of damage on the long line model in the Multisim program. **Conclusion.** Within the framework of this article, a method for estimating the state of a power transmission line using frequency analysis is proposed.

Keywords: long power line, spectral monitoring, linear parameters

For citation: Berezhnoy R. E., Kozhevnikov V. M., Petrov D. V. Frequency method of assessing the condition of the power line. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2023;4(97):7–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.4.1>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 18.05.2023;

approved after reviewing 02.06.2023;

accepted for publication 09.06.2023.

Введение / Introduction. Мониторинг линий электропередач является важной задачей для надежного электроснабжения потребителей. Известно множество методов и подходов по работе с зондирующим сигналом и по его анализу при мониторинге линии электропередачи. Зондирующий частотный сигнал используется в длинных линиях электропередачи для решения широкого спектра задач. Наиболее распространённой задачей является использование высокочастотного сигнала при определении места короткого замыкания волновым методом, оценка толщины гололедного покрытия проводов по уровню затухания высокочастотного сигнала. Наибольший интерес для большинства исследователей представляют локационные волновые методы определения места повреждения. Прототипом многих современных устройств локационного способа действия является метод, предложенный в [1] и заключающийся в измерении времени между моментом послышки в линию зондирующего электрического импульса и моментом прихода в начало линии импульса, отраженного от места замыкания и формулы для вычисления расстояния до точки замыкания.

Так в [2] предлагается посылать в линию зондирующие импульсы напряжения от генератора при согласовании выходного сопротивления последнего с волновым сопротивлением линии в соответствии с заданным диапазоном волновых сопротивлений и требуемой точностью согласования, приеме отраженных импульсов, определении места повреждения по временной задержке отраженного импульса относительно зондирующего. Также известен способ определения места повреждения линий электропередачи и связи и устройство для его осуществления, содержащее генератор зондирующих импульсов, состоящий из блока управляемого выходного сопротивления, блока памяти, цифроаналогового преобразователя и усилителя мощности, приемник, вычислительный блок, блок индикации [3].

Одной из наиболее важных информативных составляющих о состоянии линии является точная и актуальная информация о погонных параметрах линии. Задача определения этих параметров рассматривается в [4]. Предлагаемое решение состоит в идентификации погонных параметров протяженной линии электропередачи с распределенными параметрами на основе уравнений длинной линии с использованием регистраторов аварийных сигналов. Большинство авторов [5, 6] по вопросу определения фактических погонных параметров линии сводят задачу их определения к решению оптимизационной задачи с учетом ограничений по множеству факторов относительно искомых комплексных проводимостей и сопротивлений линии.

Все подходы оценки состояния линий электропередач сталкиваются с достоверности погонных параметров оцениваемых объектов. Как правило, погонные параметры являются R_0 , L_0 , G_0 и C_0 считаются заданными для конкретной линии в нормальных условиях ее эксплуатации. Очевидные их зависимости от параметров окружающей среды не учитываются. Волновые методы определения мест повреждения линий, казалось бы, не зависят от погонных параметров, т. к. измеряемой величиной является время прохождения высокочастотного сигнала до места повреждения и в обратном направлении. Для определения расстояния до места повреждения используют табличные значения скорости распространения электромагнитной волны, которая как минимум будет зависеть от диэлектрической проницаемости среды при неизменной магнитной проницаемости.

Распространение электромагнитного поля в длинных линиях электропередач описывается его интегральными характеристиками: током и напряжением, которые в случае их гармонического характера описываются волновыми уравнениями (1).

$$\begin{aligned} -\frac{d\dot{U}}{dx} &= i\dot{Z}_0 \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} &= \dot{U}Y_0. \end{aligned} \quad (1)$$

В зависимости от известных начальных условий $\dot{U}$ и $\dot{I}$, используют решения волновых уравнений (1) в двух видах:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \dot{I}_1 \dot{Z}_B \operatorname{sh} \gamma x, \\ \dot{I} &= \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}_B} \operatorname{sh} \gamma x. \end{aligned} \quad (2)$$

и

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma y + \dot{I}_2 \dot{Z}_B \operatorname{sh} \gamma y, \\ \dot{I} &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma y + \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_B} \operatorname{sh} \gamma y. \end{aligned} \quad (3)$$

где $\dot{Z}_B$ – волновое сопротивление; γ – постоянная распространения.

Используемые параметры $\dot{U}_1$, $\dot{I}_1$ и $\dot{U}_2$, $\dot{I}_2$, а также линейные координаты x и y показаны на рисунке 1.

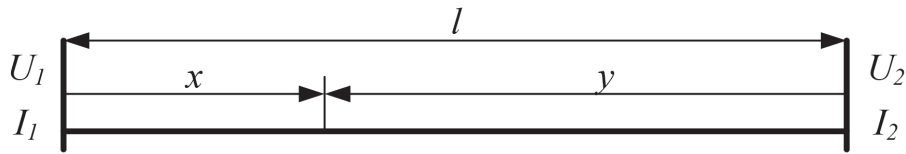


Рис. 1. Однолинейная схема линии электропередачи, где l – длина линии; x – координата от начала линии к концу; y – координата от конца линии к началу.

Решения волновых уравнений (2) и (3) позволяют определять значения $\dot{U}$ и $\dot{I}$ в любом сечении длинной линии по измеренным параметрам на входе линии $\dot{U}_1$, $\dot{I}_1$ и на выходе $\dot{U}_2$, $\dot{I}_2$, при условии достоверно известных характеристических параметрах γ и $\dot{Z}_B$, которые определяются погонными параметрами.

Целью данной работы является попытка осуществить подход к определению в режиме реального времени погонных параметров длинной линии по измерениям входных параметров $\dot{U}_1$, $\dot{I}_1$ на двух разных частотах в условиях отключенной линии, а также мест повреждения в виде короткого замыкания (КЗ) фазы на землю.

Поставленная цель может быть достигнута следующим образом. Проведя измерения $\dot{U}_1$, $\dot{I}_1$ на двух разных частотах и используя решение (3) получаем два значения $\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$ и $\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$, благодаря которым получаем систему уравнений для определения R_0 , L_0 , G_0 и C_0 [1]:

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{0,5(Z_0 Y_0 + R_0 G_0 - \omega^2 L_0 C_0)}; \\ \beta &= \sqrt{0,5(Z_0 Y_0 + \omega L_0 C_0 - R_0 G_0)}. \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + (\omega L_0)^2};$$

$$Y_0 = \sqrt{G_0^2 + (\omega C_0)^2}.$$

Такой подход дает возможность периодически актуализировать погонные параметры линий электропередачи в зависимости от погодных условий.

Однако в зависимости от условий проведения необходимых измерений не менее результативным будет подход к определению погонных параметров при реализации режима холостого хода линии для двух различных частот.

Решение волновых уравнений (3) в режиме холостого хода линии примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1x} &= \dot{U}_{2x} \operatorname{ch} \gamma l, \\ \dot{I}_{1x} &= \frac{\dot{U}_{2x}}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l. \end{aligned} \quad (5)$$

Проведя измерения в режимах холостого хода $\dot{U}_{1x}$, $\dot{I}_{1x}$ и $\dot{U}_{2x}$ для двух частот сигнала и используя выражения (5) получим систему уравнений (6) для определения погонных параметров линии:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \sqrt{(R_0 + j\omega_1 L_0)(G_0 + j\omega_1 C_0)} \\ \gamma_2 &= \sqrt{(R_0 + j\omega_2 L_0)(G_0 + j\omega_2 C_0)} \\ Z_{B1} &= \sqrt{\frac{(R_0 + j\omega_1 L_0)}{(G_0 + j\omega_1 C_0)}} \quad Z_{B2} = \sqrt{\frac{(R_0 + j\omega_2 L_0)}{(G_0 + j\omega_2 C_0)}} \end{aligned} \quad (6)$$

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Для решения системы (3) по данным замеров токов и напряжений на концах линии электропередачи относительно постоянной распространения γ может быть использована программа MathCAD. Также ее можно использовать и для последующего решения системы уравнений, подобной системе (4) для двух пар коэффициентов затухания и фазы с целью определения всех четырех первичных параметров длинной линии.

В данной работе предлагается моделировать процессы в линии с распределенными параметрами в программном комплексе Multisim. В качестве модели длинной линии будет выступать протяженная электрическая цепь (рисунок 2), состоящая из последовательно соединенных Г-образных элементов.

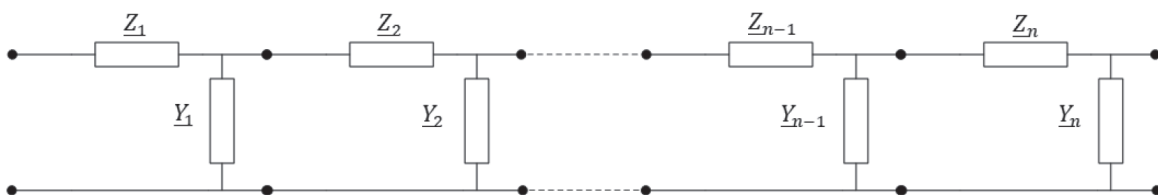


Рис. 2. Модель длинной линии из n последовательно включенных элементов

Каждый Г-образный элемент состоит из продольной части, содержащей комплексное сопротивление Z , и поперечной части, содержащей комплексную проводимость Y . Элемент имеет четыре зажима: два входных (слева) и два выходных (справа). При этом верхняя пара зажимов относится к фазному проводу моделируемой линии, а нижняя пара – к земле.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Известно, что если частота f тока и напряжения в линии соответствует такой длине волны λ , что электрическая длина линии l уместает половину длины волны $\lambda/2$, то входное сопротивление

линии оказывается равным сопротивлению нагрузки на другом ее конце. На рисунке 3 схематично изображено место повреждения (короткое замыкание) на линии электропередачи в точке, отстоящей от начала координат по оси x на l_k .

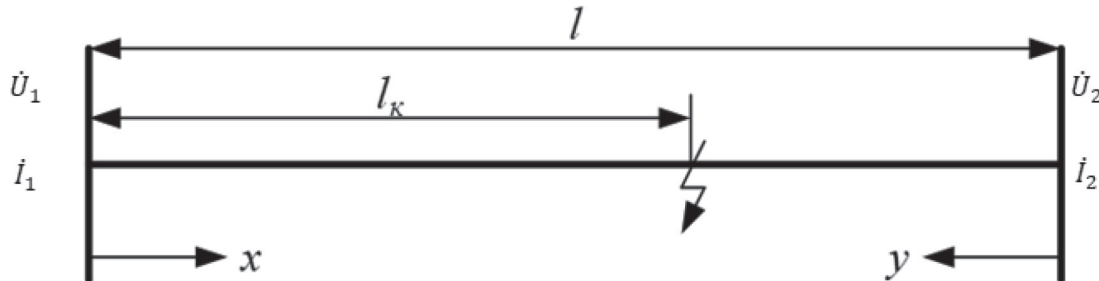


Рис. 3. Однолинейная схема линии электропередачи при повреждении

Если зондирующий сигнал имеет частоту, которая соответствует вложению половины длины волны уже не на всей длине линии, а только на ее части – до точки повреждения, т. е. $\lambda/2 = l_k$, то на входе линии, например в положительном направлении оси x , имеет место отношение:

$$Z_{\text{вх}}\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \frac{U_1}{I_1} = Z_k \quad (5)$$

Проведем моделирование в программе *Multisim*. Половина длины волны, которая укладывается на расстоянии от начала линии до точки повреждения, т. е. $\lambda/2 = 3$ км (при общей длине линии 12 км), соответствует частоте 49,528972 кГц. В таблице 1 в первой строке данных представлен результат моделирования длинной линии без потерь при повреждении на расстоянии 3 км от начала линии на частоте $f_{\lambda/2}$.

Однако при задании точного значения частоты сигнала $f_{\lambda/2} = 49,528972$ кГц не удалось получить подтверждение выражения (5). Но проведя серию процессов моделирования такой же длинной линии при повреждении в некотором диапазоне частот и ориентируясь при этом на показания тока на входе линии, получаем подтверждение выражения (5).

Результаты моделирования (при напряжении на генераторе 5 В и сопротивлении в точке повреждения 0,1 Ом) показаны в таблице.

Таблица

Приближение к частоте полуволны модели

№ п/п	Частота сигнала, кГц	Ток на входе линии, А
1	49,528972	0,0729
2	48,5	0,111
3	47,5	0,242
4	46,7	17,1
5	46,6915	49,6
6	46,691	49,9
7	46,6905	49,9
8	46,69	49,9
9	46,689	45,7
10	46,65	4,69
11	46,6	2,07

Из анализа данных моделирования видно, что наибольшего действующего значения тока удалось получить при частоте $f_1 = 46,6905$ кГц. Расстояние, которое соответствует длине полу-волны на частоте f_1 составляет

$$l_1 = \frac{c}{2f_1} = 3,017 \text{ км.}$$

Таким образом, по результатам моделирования, расстояние до точки повреждения составляет 3,017 км при реальном положении точки повреждения на расстоянии 3 км. Разница составляет $\Delta l_1 = (\lambda/2) - l_1 = 3 - 3,017 = -0,017$ км, что соответствует 17 м при общей длине линии 12 000 м.

Заключение / Conclusion. В рамках данной статьи предложен метод оценивания состояния линии электропередачи с помощью частотного анализа. Данный метод решает задачу определения актуальных погонных параметров линии по данным замеров токов и напряжений по концам линии при двух различных частотах зондирующего сигнала в нагрузочном режиме и режиме холостого хода линии. Также в статье представлены результаты практического применения предлагаемого метода для определения места повреждения на модели линии в программе Multisim.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт. Москва : Энергоиздат, 1982. 312 с.
2. Патент: RU 2 330 298 C2. «Способ определения места повреждения линий электропередачи и связи и устройство для его осуществления» заявка RU 2006123891/28. Опубликовано: 2008.01.10 Бюл. №1. Дата подачи заявки: 2006.07.03.
3. Патент RU 2 269 789. «Способ определения места повреждения линий электропередачи и связи и устройство для его осуществления». Опубликовано: 10.02.2006. Дата подачи заявки: 27.09.2004.
4. Хрущев Ю. В. Идентификация погонных параметров протяженной линии электропередачи с использованием регистраторов аварийных сигналов / Ю. В. Хрущев, Н. Л. Бацева, Л. В. Абрамочкина // Известия Томского политехнического университета. 2011. № 4. С. 118–122.
5. Иванов И. Е. Оценка влияния различных факторов на значения сопротивлений и проводимостей высоковольтной воздушной линии электропередачи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 3. С. 30–39.
6. Абрамочкина Л. В. Методика определения места короткого замыкания на линии электропередачи повышенной точности // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 2. С. 32–35.
7. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. Москва : Энергия, 1975. 752 с.

REFERENCES

1. Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh (Determination of damage sites in electrical networks)/ G.M. Shalyt. Moskva : Energoizdat, 1982. 312 s.
2. Patent: RU 2 330 298 C2. «Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektropredachi i svyazi i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya» («A method for determining the location of damage to power transmission and communication lines and a device for its implementation») zayavka RU 2006123891/28. Opublikovano: 2008.01.10 Byul. №1. Data podachi zayavki: 2006.07.03.
3. Patent RU 2 269 789. «Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektropredachi i svyazi i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya» («A method for determining the location of damage to power transmission and communication lines and a device for its implementation»). Opublikovano: 10.02.2006. Data podachi zayavki: 27.09.2004.
4. Khrushchev Yu. V. Identifikatsiya pogonnykh parametrov protyazhennoi linii elektropredachi s ispol'zovaniem registratorov avariinykh signalov (Identification of linear parameters of an extended power transmission line using emergency signal recorders)/ Yu. V. Khrushchev, N. L. Batseva, L. V. Abramochkina // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2011. № 4. S. 118–122.

5. Ivanov I. E. Otsenka vliyaniya razlichnykh faktorov na znacheniya soprotivlenii i provodimostei vysokovol'tnoi vozdukhnoi linii elektropredachi (Assessment of the influence of various factors on the values of resistances and conductivities of a high-voltage overhead power transmission line) // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2017. № 3. S. 30–39.
6. Abramochkina L. V. Metodika opredeleniya mesta korotkogo замыкания na linii elektropredachi povyshennoi tochnosti (The method of determining the location of a short circuit on a power line of increased accuracy) // Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya. 2012. № 2. S. 32–35.
7. Osnovy teorii tsepei: uchebnik dlya vuzov (Fundamentals of circuit theory: textbook for universities) / G. V. Zeveke, P. A. Ionkin, A. V. Netushil, S. V. Strakhov. Moskva : Energiya, 1975. 752 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бережной Роман Евгеньевич – студент 1 курса магистратуры по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», кафедра автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института СКФУ.

Кожевников Владимир Михайлович – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института СКФУ.

Петров Денис Васильевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института СКФУ.

ВКЛАД АВТОРОВ

► **Бережной Роман Евгеньевич**

Моделирование в программе Multisim. Сбор, обработка и анализ полученных данных. Структурирование статьи согласно утвержденному плану.

► **Кожевников Владимир Михайлович**

Описание теоретических аспектов предлагаемого метода, выработка основных направлений возможного практического применения указанного метода. Утверждение окончательного варианта структуры и содержания статьи.

► **Петров Денис Васильевич**

Методологическое сопровождение математического моделирования предлагаемого метода. Подготовка и редактирование текста статьи. Формирование ее окончательного варианта.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman E. Berezhnoy – 1st year Master's student in the direction of 13.04.02 "Electric power engineering and Electrical Engineering", Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply Engineering Institute of the North Caucasus Federal University.

Vladimir M. Kozhevnikov – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply Engineering Institute of the North Caucasus Federal University.

Denis V. Petrov – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute of the North Caucasus Federal University.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

► **Roman E. Berezhnoy**

Modeling in the Multisim program. Collection, processing and analysis of the received data. Structuring the article according to the approved plan.

► **Vladimir M. Kozhevnikov**

Description of the theoretical aspects of the proposed method, development of the main directions of possible practical application of this method. Approval of the final version of the structure and content of the article.

► **Denis V. Petrov**

Methodological support of mathematical modeling of the proposed method. Preparation and editing of the text of the article. Formation of its final version.