

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ КООРДИНАТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Логунов А.В.<sup>1</sup>, Шлык Ю.К.<sup>2</sup>

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

<sup>1</sup>ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-3735-7877>,

[logunovav97@mail.ru](mailto:logunovav97@mail.ru), <sup>2</sup>[shlyk53@mail.ru](mailto:shlyk53@mail.ru)

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Задача оперативного и точного определения места повреждения (ОМП) в кабельных линиях электропередачи является одной из ключевых в процессе обеспечения надежного и бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией. Разработка нового алгоритма решения этой задачи, который позволит минимизировать время и ресурсы, затрачиваемые на поиск повреждений, является актуальным направлением современных исследований. *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть основные недостатки и ограничения существующих методов ОМП кабельных линий. Разработать алгоритм ОМП кабельной линии на основе теории длинных линий с использованием оригинальных амплитудно-фазовых координатных характеристик. Реализовать алгоритм получения теоретических характеристик зависимости параметров входного тока от координаты повреждения линии на конкретном числовом примере. *МЕТОДЫ.* При решении поставленных задач применялись методы теории длинных линий и классической теории электрических цепей, реализованные средствами программного комплекса Wolfram Mathematica. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, рассмотрены основные недостатки существующих методов ОМП кабельных линий. Разработан и на конкретном числовом примере реализован алгоритм определения места повреждения для однофазной кабельной линии, основанный на совместном использовании специального вида дублированных координатно-зависимых (АКХ) и (ФКХ) характеристик, рассчитанных с использованием программного комплекса Wolfram Mathematica. Приведены соответствующие графические построения и описан вариант практической реализации предлагаемого алгоритма. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* По результатам теоретических расчетов предложенный алгоритм определения места повреждения однофазной кабельной линии электропередачи позволяет с заданной точностью определять координату повреждения для случаев обрыва и короткого замыкания во всем диапазоне длины линии. Полученные теоретические расчеты нуждаются в соответствующей экспериментальной проверке на следующем этапе исследований.

**Ключевые слова:** моделирование; место повреждения линии; алгоритм; кабельная линия; амплитудно-фазовая координатная характеристика.

**Для цитирования:** Логунов А.В., Шлык Ю.К. Разработка алгоритма определения места повреждения кабельной линии с использованием ее амплитудно-фазовых координатных характеристик // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. №. С.93-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-93-104.

## DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR DETERMINATION OF LOCATION OF CABLE LINE DAMAGE USING ITS AMPLITUDE-PHASE COORDINATE CHARACTERISTICS

AV. Logunov<sup>1</sup>, YuK. Shlyk<sup>2</sup>

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

<sup>1</sup>ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3735-7877>,

[logunovav97@mail.ru](mailto:logunovav97@mail.ru), <sup>2</sup>[shlyk53@mail.ru](mailto:shlyk53@mail.ru)

**Abstract:** *RELEVANCE.* The task of prompt and accurate determination of the fault location in cable transmission lines is one of the key in the process of ensuring a reliable and uninterrupted

supply of electricity to consumers. The development of a new algorithm for solving this problem, which will minimize the time and resources spent on finding damage, is an urgent area of modern research. **THE PURPOSE.** Consider the main shortcomings and limitations of the existing methods of determining fault location to cable lines. Develop an algorithm for the determining fault location to cable line based on the theory of long lines using the original amplitude-phase coordinate characteristics. Implement an algorithm for obtaining theoretical characteristics of the dependence of the input current parameters on the line fault coordinate using a specific numerical example. **METHODS.** When solving the tasks set, the methods of the theory of long lines and the classical theory of electrical circuits were used, implemented by means of the Wolfram Mathematica software package. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers the main shortcomings of the existing methods of determining fault location to cable lines. An algorithm for determining the fault location for a single-phase cable line has been developed and implemented on a specific numerical example, based on the joint use of a special type of duplicated coordinate-dependent (ACC) and (FCC) characteristics calculated using the Wolfram Mathematica software package. The corresponding graphic constructions are given and a variant of the practical implementation of the proposed algorithm is described. **CONCLUSION.** According to the results of theoretical calculations, the proposed algorithm for determining the location of damage to a single-phase cable power transmission line allows, with a given accuracy, to determine the coordinate of damage for cases of breakage and short circuit in the entire range of line length. The obtained theoretical calculations need appropriate experimental testing in the next stage of research.

**Key words:** modeling; the location of the line failure; algorithm; cable line; amplitude-phase coordinate characteristic.

**For citation:** Logunov AV, Shlyk YuK. Development of algorithm for determination of location of cable line damage using its amplitude-phase coordinate characteristics. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3):93-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-93-104.

### **Введение (Introduction)**

Эффективность работы любых электротехнических комплексов неразрывно связана с бесперебойной поставкой электроэнергии к потребителям, которая осуществляется по кабельным или воздушным линиям электропередачи.

Всякое нарушение целостности линии, вызванное тем или иным видом повреждения, неизбежно отразится на режиме работы всего комплекса [1].

При такой проблеме основной задачей эксплуатирующей сетевой организации является максимально быстрое и точное определение места повреждения (ОМП) электрической линии, чтобы исключить длительный перерыв нормального электроснабжения потребителей и минимизировать сопутствующие убытки.

Цель исследования: разработать алгоритм ОМП кабельной линии, основанный на использовании зависимостей параметров входного тока от координаты повреждения линии, который обеспечит необходимую точность и достоверность результатов. Научная значимость исследования заключается в разработке нового алгоритма, базирующегося на использовании оригинальных амплитудно-фазовых координатных характеристик в рамках теории длинных линий. Практическая значимость результатов исследования определяется возможностью их использования в качестве универсального подхода к решению задачи ОМП кабельных линий для случаев обрыва и короткого замыкания, что подтверждается расчетом числового примера.

### **Литературный обзор (Literature Review)**

Арсенал современных методов и средств определения места повреждения электрических линий весьма разнообразен. В их числе можно назвать такие дистанционные методы, как: импульсный, петлевой, метод колебательного разряда, емкостной и волновой [2-7].

Самостоятельную группу образуют топографические методы, к которым относятся: потенциальный, индукционный и акустический.

Все эти методы имеют сугубо экспериментальный характер. Их целью является определение координаты места повреждения линии, однако достигается она опосредовано, через измерение других величин, причем не электрической природы.

К примеру, в импульсном и волновом методах измеряемой величиной является время [8, 9]. В емкостном методе измеряют емкость оборванных жил кабеля, а в петлевом – их электрическое сопротивление [10-13].

Все эксперименты, которые проводятся в рамках реализации названных методов являются, как правило, сложно организованными, поскольку они осуществляются с учетом выполнения различного рода особых условий, таких как электрический пробой изоляции в методе колебательного разряда, или ограничений, которые накладываются на величину переходного сопротивления в месте повреждения при использовании емкостного метода [7].

Топографические методы вообще имеют особый статус, поскольку применяются в полевых условиях и могут использоваться для уточнения координаты места повреждения, предварительно определенной тем или иным методом дистанционной группы. При этом поиск повреждения на трассе прокладки кабеля осуществляется с использованием специализированной контрольно-измерительной аппаратуры промышленного производства [14].

Из всего сказанного можно сделать вывод о том, что существующие на сегодня методы не свободны от недостатков. В числе главных выделим сложность технической реализации и невысокую точность в определении места повреждения линии, которая в ряде случаев компенсируется совместным использованием двух и более методов одновременно [15-17].

Данное обстоятельство является основанием для разработки принципиально иного подхода к решению этой проблемы, в котором главенствующая роль будет отводиться теоретическим разработкам модели электрической линии с повреждением. Классическим примером модели такого рода может считаться линия с распределенными параметрами, в которой произошло нарушение однородности ее структуры<sup>1</sup>.

#### Материалы и методы (Materials and methods)

Поставим задачу определения входного тока линии, находящейся в режиме холостого хода или короткого замыкания, с последующим уменьшением длины  $l$  (рис. 1), которое будет обусловлено возникновением этих предельных режимов в том или ином ее сечении  $X$ .

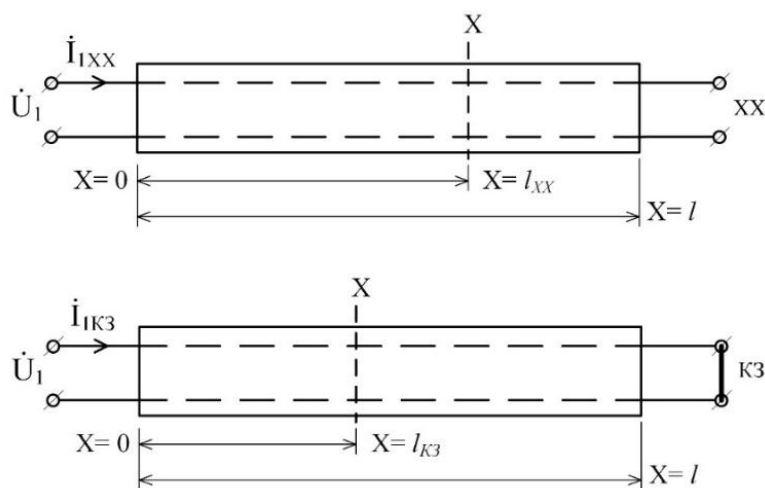


Рис. 1. Режимы холостого хода и короткого замыкания линии.  $X$  – координата возможного места повреждения,  $\dot{I}_{1XX}$  и  $\dot{I}_{1K3}$  – комплексные токи линии в режимах холостого хода и короткого замыкания соответственно\*

Fig. 1. Open circuit and short circuit modes.  $X$  - is the coordinate of the possible damage site,  $\dot{I}_{1XX}$  and  $\dot{I}_{1K3}$  - are the complex currents of the line in the idle and short circuit modes, respectively\*

\*Made by the author

\*Разработано автором

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

<sup>1</sup> Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.

Указанные соотношения для комплексных токов  $\dot{I}_{1XX}$  и  $\dot{I}_{1K3}$  неповрежденной линии примут вид:

$$\dot{I}_{1XX} = \frac{\dot{U}_1}{Z_\epsilon \cdot \text{cth}(\gamma l)}, \quad (1)$$

$$\dot{I}_{1K3} = \frac{\dot{U}_1}{Z_\epsilon \cdot \text{th}(\gamma l)} \quad (2)$$

где  $\dot{U}_1 = U_{1m} e^{j\psi_u}$ ;

$U_{1m}$  - амплитуда синусоидального источника напряжения, питающего линию;

$\psi_u$  - начальная фаза напряжения;

$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$  - волновое сопротивление линии;

$R_0, L_0, C_0, G_0$  - сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость единицы длины линии;

$j = \sqrt{-1}$ ;

$\omega = 2\pi f$  - угловая частота источника напряжения;

$f$  - его частота в [Гц];

$\text{th}$  и  $\text{cth}$  - гиперболические функции тангенс и котангенс;

$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)}$  - постоянная распространения линии.

Очевидно, что путем замены постоянной  $l$ , входящей в формулы (1) и (2), на переменную координату возможного места повреждения  $0 < X \leq l$ , можно получить соответствующие комплексные функции токов  $\dot{I}_{1XX}(jX)$  и  $\dot{I}_{1K3}(jX)$ :

$$\dot{I}_{1XX}(jX) = I_{1mXX}(X) \cdot e^{j\psi_{1XX}^{(1)}(X)} \quad (3)$$

$$\dot{I}_{1K3}(jX) = I_{1mK3}(X) \cdot e^{j\psi_{1K3}^{(1)}(X)} \quad (4)$$

где  $I_{1mXX}(X)$  и  $I_{1mK3}(X)$  – амплитудно-координатные (АКХ) характеристики;

$\psi_{1XX}^{(1)}(X)$  и  $\psi_{1K3}^{(1)}(X)$  – фазо-координатные (ФКХ) характеристики – соответственно.

По существу функции (3) и (4) являются амплитудно-фазовыми координатными (АФКХ) характеристиками линии с повреждением, которые можно рассматривать в качестве эквивалента общеизвестных (АФЧХ) характеристик [18], являющихся базовым инструментом исследования сложных технических систем.

В рамках рассматриваемой задачи (АФКХ) характеристики позволяют установить взаимосвязь между параметрами входного тока линии и координатой места ее возможного обрыва или короткого замыкания.

#### Результаты (Results)

Реализуемость предлагаемого алгоритма определения места повреждения линии, покажем на конкретном числовом примере.

Для этого рассмотрим некоторую условную кабельную линию длиной  $l = 10$  км со среднестатистическим погонными параметрами:  $R_0 = 20,5$  Ом/км;  $L_0 = 0,6 \cdot 10^{-3}$  Гн/км;  $C_0 = 35,2 \cdot 10^{-9}$  Ф/км и  $G_0 = 0,7 \cdot 10^{-6}$  См/км.

Задав параметры источника напряжения:  $U_{1m} = 10 \text{ В}$ ,  $\psi_u = 0^\circ$  и  $f = 20 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ , произведем расчет (АФКХ) характеристик (3) и (4), используя программный комплекс *Wolfram Mathematica*.

Результаты приведены на рисунках 2 и 3.

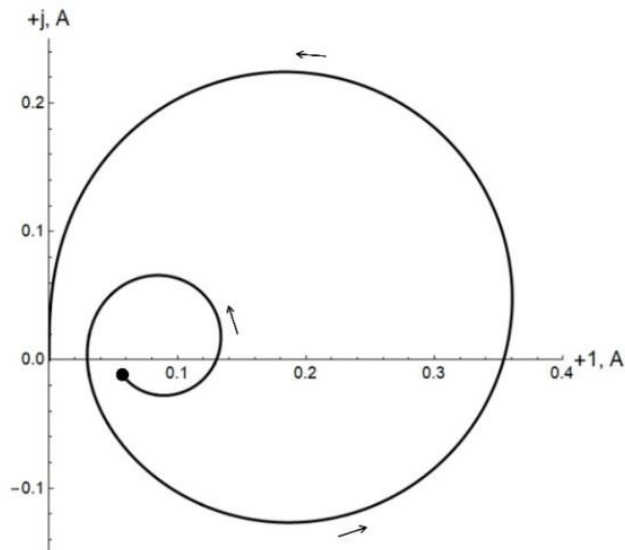


Рис. 2. (АФКХ)<sub>ХХ</sub> характеристика\*

Fig. 2. (APhCC)<sub>IDL</sub> characteristic\*

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

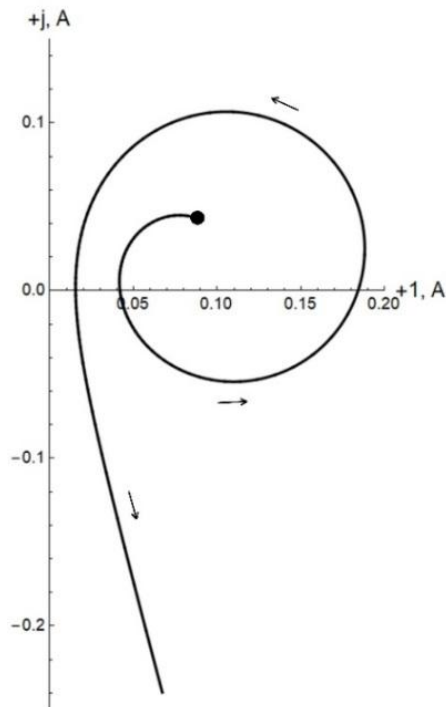


Рис. 3. (АФКХ)<sub>КЗ</sub> характеристика

Fig. 3. (APhCC)<sub>SCT</sub> characteristic

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

На данном этапе исследования сузим поставленную выше задачу и ограничимся ее решением применительно к режиму холостого хода (обрыву) линии. Для этого перейдем от комплексной (АФКХ)<sub>ХХ</sub> по рис. 2 к координатно зависимым (АКХ) и (ФКХ) характеристикам.

Соответствующие графики даны на рисунках 4 и 5.

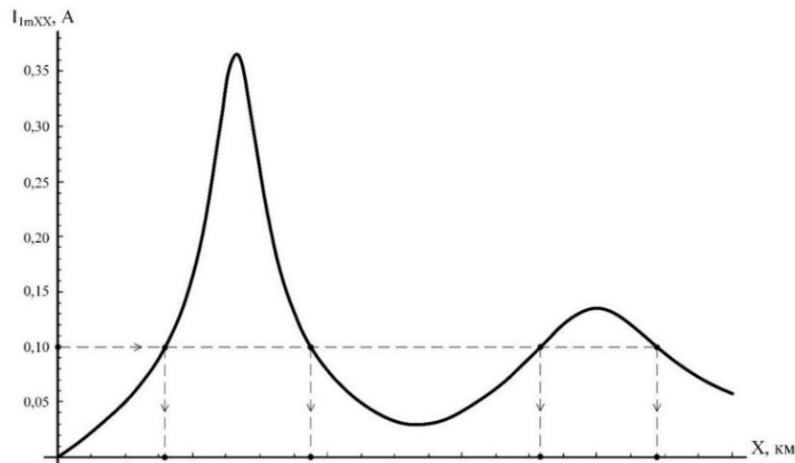


Рис. 4.  $(AKX)_{XX}$  характеристика

Fig. 4.  $(ACC)_{IDL}$  characteristic

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

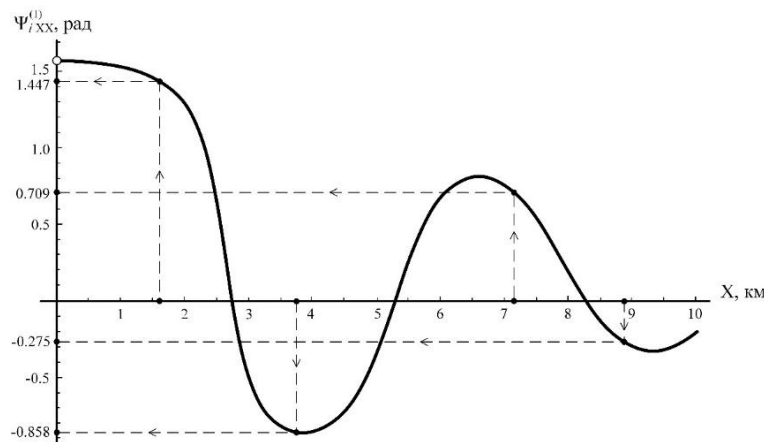


Рис. 5.  $(ФКX)_{XX}$  характеристика

Fig. 5.  $(PhCC)_{IDL}$  characteristic

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Из представленных зависимостей очевидна взаимосвязь параметров входного тока линии ( $I_{mXX}$  и  $\psi_{iXX}^{(1)}$ ) и координаты повреждения ( $X$ ). Однако, в силу периодичности данных функций эта взаимосвязь неоднозначна.

К примеру, для  $I_{mXX} = 0,1$  А (рис. 4) координаты  $X$  примут значения: 1596; 3759; 7157 и 8895 метров, а для этих же  $X$  начальные фазы  $\psi_{iXX}^{(1)}$  будут: 1,447;  $-0,858$ ; 0,709 и  $-0,275$  радиан соответственно (рис. 5).

Необходимо отметить, что  $\psi_{iXX}^{(1)}$  определяет характер нагрузки линии, т.е. угол  $\varphi$ , который определяется по соотношению:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -\psi_i \quad (5)$$

учитывая ранее принятое значение  $\psi_u = 0$ .

Таким образом, знакопеременность  $\psi_{iXX}^{(1)}(X)$  делает неоднозначным и характер нагрузки линии относительно зажимов источника.

Причина периодичности функций  $I_{mXX}(X)$  и  $\psi_{iXX}^{(1)}(X)$  объясняется тем, что физическая длина линии существенно превышает длину волны тока и напряжения  $\lambda$ , которая может быть определена по формуле:

$$\lambda = \frac{V_\phi}{f}, \quad (6)$$

где  $V_\phi$  - фазовая скорость распространения волн тока и напряжения в линии.

Из сказанного следует, что проблему неоднозначности функций  $(AKX)_{XX}$  и  $(ФКX)_{XX}$  можно решить путем подбора соответствующей частоты источника напряжения. Она должна быть такой, чтобы соответствующая ей длина волны по формуле (6) в 4 раза превышала физическую длину линии. В нашем случае ее значение составит  $\lambda = 40$  км.

Задаваясь средним значением  $v_\phi = 1,7 \cdot 10^5$  км/с для кабельных линий<sup>2</sup>, определим верхнее значение частоты источника, которое будет равняться  $f = 4250$  Гц.

Приняв к дальнейшему расчету  $f = 4000$  Гц, построим для нее новые  $(AKX)_{XX}$  и  $(ФКX)_{XX}$  - характеристики, которые приведены на рисунке 6.

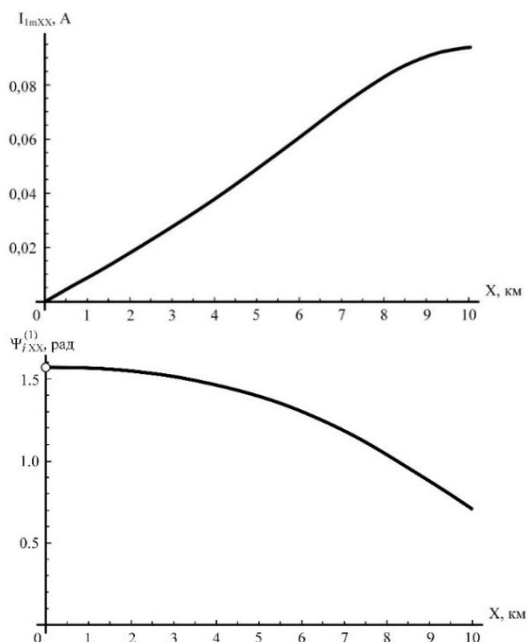


Рис. 6.  $(AKX)_{XX}$  и  $(ФКX)_{XX}$  характеристики при  $f = 4000$  Гц Fig. 6.  $(ACC)_{IDL}$  and  $(PhCC)_{IDL}$  characteristics at  $f = 4000$  Hz

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Используя тот же алгоритм решения, построим  $(AKX)_{K3}$  и  $(ФКX)_{K3}$  характеристики применительно к режиму короткого замыкания линии. Их вид представлен на рисунке 7.

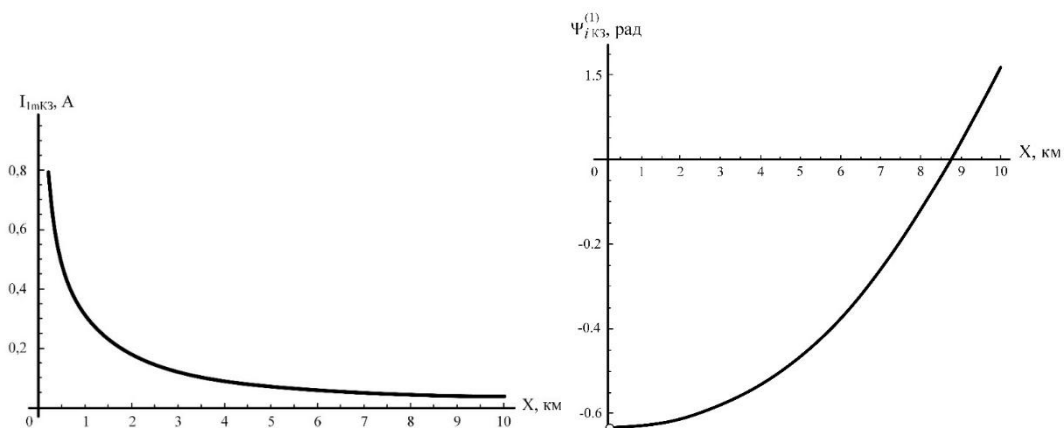


Рис. 7.  $(AKX)_{K3}$  и  $(ФКX)_{K3}$  характеристики при  $f = 4000$  Гц Fig. 7.  $(ACC)_{SCT}$  and  $(PhCC)_{SCT}$  characteristics at  $f = 4000$  Hz

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

При практической реализации предложенного алгоритма линию с повреждением подключают к синусоидальному генератору напряжения с расчетными значениями  $U_m$  и  $f$ . Далее производят измерение амплитуды входного тока линии  $I_{1m}$  и ее угла  $\varphi_1$  с

<sup>2</sup> Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.

использованием, например, виртуального комплекса National Instruments Elvis II, а затем по характеристикам рис. 6 или рис. 7 определяют искомую координату места повреждения  $X$ .

Важно отметить, что совместное использование (АКХ) и (ФКХ) характеристик повышает достоверность в определении координаты  $X$ , поскольку ее расчетное значение будет продублировано результатами одновременного измерения тока  $I_{1m}$  и угла  $\varphi_1$  на входе линии.

#### Обсуждение (Discussions)

И все же, предложенный алгоритм имеет один существенный, на наш взгляд, недостаток. Речь идет о регистрации токов на входе линии в области малых значений  $X$ . Причем это касается обоих видов повреждений.

При  $X \rightarrow 0$  входные токи будут стремиться к своим предельным значениям  $I_{1mXX} \rightarrow 0$ ;  $I_{1mK3} \rightarrow \infty$ , что создает очевидные проблемы в плане точности их измерения на практике.

Данную сложность можно преодолеть, если к уже имеющимся  $I_{1mXX}$  и  $I_{1mK3}$  добавить регистрацию токов на выходе линии  $I_{2mXX}$  и  $I_{2mK3}$ .

Это легко реализовать путем подключения генератора напряжения с теми же  $U_m$  и  $f$  к выходным зажимам линии.

Такой подход позволил построить вторые ветви (АКХ) и (ФКХ) характеристик, которые зеркально расположены относительно оси, проходящей через координату середины линии. Их расчет был произведен с использованием того же программного комплекса *Wolfram Mathematica*.

Результаты приведены на рисунках 8 и 9.

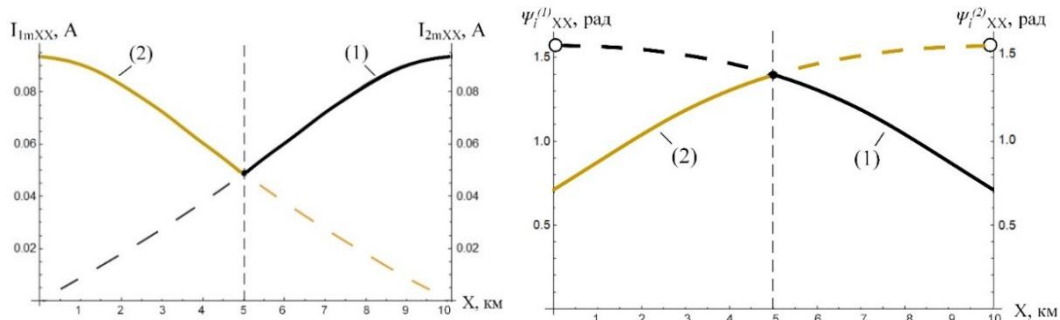


Рис. 8. Дублированные (АКХ)<sub>ХХ</sub> и (ФКХ)<sub>ХХ</sub> характеристики:

- (1) – характеристики, полученные при подключении генератора в начале линии;
- (2) – характеристики, полученные при подключении генератора в конце линии

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Fig. 8. Duplicated (ACC)<sub>IDL</sub> and (PhCC)<sub>IDL</sub> characteristics:

- (1) - characteristics obtained by connecting the generator at the beginning of the line;
- (2) - characteristics obtained by connecting the generator at the end of the line

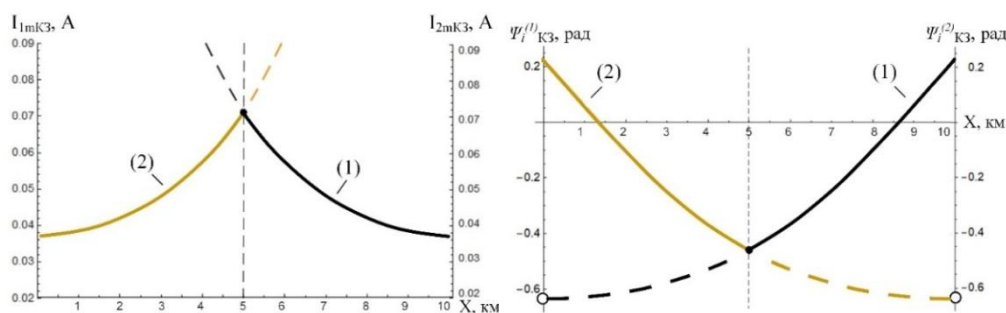


Рис. 9. Дублированные (АКХ)<sub>КЗ</sub> и (ФКХ)<sub>КЗ</sub> характеристики:

- (1) – характеристики, полученные при подключении генератора в начале линии;
- (2) – характеристики, полученные при подключении генератора в конце линии

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Fig. 9. Duplicated (ACC)<sub>SCT</sub> and (PhCC)<sub>SCT</sub> characteristics:

- (1) - characteristics obtained by connecting the generator at the beginning of the line;
- (2) - characteristics obtained by connecting the generator at the end of the line

Из графиков очевидно, что величина изменения токов и их начальных фаз лежит в ограниченном диапазоне. Это дает основание считать, что в ходе проведения экспериментальных исследований они могут быть измерены с заданной степенью точности,



которая будет определяться классом точности средств измерения параметров линии на входе.

При этом вопрос принадлежности параметра к той или иной характеристике решается следующим образом: проводится измерение тока  $I_m$  и угла  $\varphi$  при подключении генератора в начале линии (характеристика 1), и в случае получения значения, лежащего вне зоны чувствительности измерительного комплекса, производится аналогичный замер в конце линии, что позволяет определить координату  $X$  по характеристике 2.

Базовый вариант блок-схемы предложенного алгоритма представлен на рисунке 10.

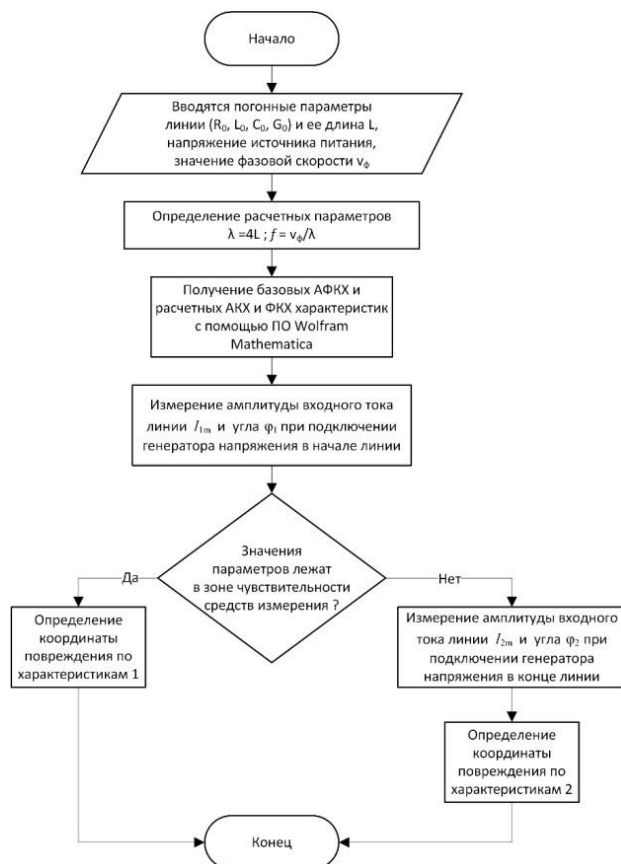


Рис. 10. Блок-схема предложенного алгоритма определения места повреждения кабельной линии

Fig. 10. Block diagram of the proposed algorithm for determining the location of damage to the cable line

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

#### Заключение (Conclusion)

На основе классической теории длинных линий получены специального типа комплексные функции зависимости параметров входного тока кабельной линии от координаты ее повреждения.

Предложен алгоритм определения места повреждения однофазной кабельной линии электропередачи, основанный на совместном использовании специального вида дублированных координатно-зависимых (АКХ) и (ФКХ) характеристик, рассчитанных с использованием программного комплекса Wolfram Mathematica.

Возможность реализации предложенного алгоритма протестирована на конкретном числовом примере для случаев обрыва и короткого замыкания некоторой условной однофазной кабельной линии. Выявлено, что по построенным графикам можно однозначно определить точную координату места повреждения линии, за исключением области предельных значений параметров тока в начале линии.

Для обеспечения заданной точности определения координаты повреждения во всем диапазоне длины линии предложено использование метода двухсторонних измерений и совместное использование полученных в результате этого характеристик.

Полученные теоретические расчеты нуждаются в соответствующей экспериментальной проверке, что станет предметом дальнейших исследований.

### Литература

1. Виноградов А. В. Анализ повреждаемости электрооборудования электрических сетей и обоснование мероприятий по повышению надежности электроснабжения потребителей / А. В. Виноградов, Р. А. Пеньков // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 12(55). – С. 12-21.
2. Основные методы определения мест повреждения (ОМП). Режим доступа: <https://angstremip.ru/blog/492/>.
3. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / М: НТФ «Энергопресс», 1998. 87 с.
4. Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 16-21. – doi 10.17588/2072-2672.2016.5.016-021.
5. Saha, M., Izykowski, J. and Rosolowski, E., Fault location on power networks, Springer, London, 2010. doi: 10.1007/978-1-84882-886-5.
6. Yi Sun et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 696 012047.
7. H. Panahi, R. Zamani, M. Sanaye-Pasand and H. Mehrjerdi, Advances in Transmission Network Fault Location in Modern Power Systems: Review, Outlook and Future Works, in IEEE Access, vol. 9, pp. 158599-158615, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129838.
8. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения линий электропередачи импульсными методами / Г. М. Шалыт // М. : «Энергия», 1968. – 216 с.
9. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи / А. И. Федотов, Г.В. Вагапов, А. Ф. Абдуллазянов, А. М. Шаряпов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 146-155. doi 10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155.
10. Bukvisova, Z., Orsagova, J., Topolanek, D. & Toman, P. 2019, Two-terminal algorithm analysis for unsymmetrical fault location on 110 kV lines, Energies, vol. 12, no. 7. doi: 10.3390/en12071193.
11. Dian Lu, Yu Liu, Dayou Lu, Binglin Wang, Xiaodong Zheng, Unsynchronized fault location on untransposed transmission lines with fully distributed parameter model considering line parameter uncertainties, Electric Power Systems Research, Volume 202, 2022, 107622.
12. Hafizi Bin Idris, M. (2020). Combination effects of fault resistance and remote in feed current on simple impedance based fault location. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1432(1) doi:10.1088/1742-6596/1432/1/012002.
13. N. Cifuentes and B. C. Pal, A New Approach to the Fault Location Problem: Using the Fault's Transient Intermediate Frequency Response, in IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 8, pp. 510-521, 2021, doi: 10.1109/OAJPE.2021.3089678.
14. Авдеева, К. В. Анализ топографических методов определения мест повреждения изоляции кабеля / К. В. Авдеева, Ю. М. Елизарова // Приднепровский научный Вестник. 2019. Т. 7. № 2. С. 37-40.
15. Кучерявенков А.А., Рукавицын А.А., Феоктистов А.В., и др. Способ определения места повреждения кабельных и воздушных линий электропередач // Патент РФ № 2733825. 2020. Бюл. №28.
16. Эрекайкин, Е. И. Методика определения мест повреждения кабельных линий в распределительных электрических сетях 10 кВ / Е. И. Эрекайкин, Д. В. Армеев, Я. А. Фролова // Электроэнергетика глазами молодежи - 2018: Материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 01–05 октября 2018 года / Ответственный редактор Э.В. Шамсутдинов. Том 2. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 166-169.
17. Кашин Я.М., Кириллов Г.А., Сидоренко В.С., Гайдамашко А. И. Перспективный способ повышения точности определения мест повреждения кабельных линий электропередачи и устройство по его реализации // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер: Естественно-математические и технические науки. 2020. № 3(266). С. 52-58.
18. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системам. Москва: «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 1993. 492 с.

### Авторы публикации

**Логунов Андрей Владимирович** – аспирант, Тюменский индустриальный университет.

**Шлык Юрий Константинович** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика», Тюменский индустриальный университет.

### References

1. Vinogradov A.V., Per'kov R.A. Analysis of damage to electrical equipment of electrical networks and justification of measures to improve the reliability of power supply to consumers. *Vestnik NGIEI* [Bulletin NGIEI], 2015, no. 12(55), pp. 12-21.
2. Basic methods for determining damage locations (OMP). Available at: <https://angstremip.ru/blog/492/> (accessed 1 March 2023).
3. Arzhannikov E.A., Chukhin A.M. *Metody i pribory opredeleniya mest povrezhdeniya na liniyakh elektropredachi* [Methods and devices for determining the location of damage on power lines]. Moscow, NTF «Energopress» Publ., 1998. 87 p.
4. Kulikov A.L., Lukicheva I.A. Determining the location of damage to a power line by instantaneous values of oscillograms of emergency events. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2016, no. 5, pp. 16-21. doi:10.17588/2072-2672.2016.5.016-021
5. Saha, M., Izykowski, J. and Rosolowski, E., Fault location on power networks, Springer, London, 2010. doi: 10.1007/978-1-84882-886-5.
6. Yi Sun et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 696 012047.
7. H. Panahi, R. Zamani, M. Sanaye-Pasand and H. Mehrjerdi, Advances in Transmission Network Fault Location in Modern Power Systems: Review, Outlook and Future Works in IEEE Access. 2021;9:158599-158615, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129838.
8. Shalyt G.M. *Opredelenie mest povrezhdeniya linii elektropredachi impul'snymi metodami* [Determination of damage points of power transmission lines by pulse methods]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 216 p.
9. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Abdullazyanov A.F., Sharyapov A.M. Digital power lines faults monitoring system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):146-155. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155>.
10. Bukvisova Z, Orsagova J, Topolanek D. & Toman, P. 2019, «Two-terminal algorithm analysis for unsymmetrical fault location on 110 kV lines», *Energies*. V. 12, no. 7. doi: 10.3390/en12071193.
11. Dian Lu, Yu Liu, Dayou Lu, et al. Unsynchronized fault location on untransposed transmission lines with fully distributed parameter model considering line parameter uncertainties, *Electric Power Systems Research*, Volume 202, 2022, 107622.
12. Hafizi Bin Idris, M. (2020). Combination effects of fault resistance and remote in feed current on simple impedance based fault location. *Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series*, 1432(1) doi:10.1088/1742-6596/1432/1/012002.
13. N. Cifuentes and B. C. Pal, A New Approach to the Fault Location Problem: Using the Fault's Transient Intermediate Frequency Response, in IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 8, pp. 510-521, 2021, doi: 10.1109/OAJPE.2021.3089678.
14. Avdeeva KV, Elizarova YuM. Analysis of topographic methods for determining cable insulation damage sites. *Pridneprovskiy nauchnyy vestnik* [Pridneprovsky scientific bulletin], 2019;7(2):37-40.
15. Kucheryavenkov AA, Rukavitsyn AA, Feoktistov AV, et al. *Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya kabel'nykh i vozdukhnykh liniy elektropredach* [Method for determining the location of damage to cable and overhead power lines]. Patent RF, no. 2733825, 2020.
16. Erekaikin EI, Armeev DV, Frolova YaA. Methodology for determining the locations of damage to cable lines in distribution electrical networks 10 kV. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: Materialy IX Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. V 3-kh tomakh, Kazan', 01-05 oktyabrya 2018 goda. Otv. Redactor E.V. Shamsutdinov. Tom 2*. [Power industry through the eyes of youth - 2018: Materials of the IX International Youth Scientific and Technical conferences. In 3 volumes, Kazan, October 01–05, 2018. Managing editor E.V. Shamsutdinov. V.2]. Kazan, Kazan State Power Engineering University Publ., 2018, pp. 166-169.
17. Kashin YaM, Kirillov GA, Sidorenko VS, et al. A promising method for improving the accuracy of determining the location of damage to cable power lines and a device for its implementation. *Vestnik Adygeiskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. Estesstvenno-*

*matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [The Bulletin of the Adyghe State University. Ser.: Natural-Mathematical and Technical Sciences], 2020, no. 3(266), pp. 52-58.

18.Solodovnikov VV, Plotnikov VN, Yakovlev AV. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tekhnicheskimi sistemami [Theory of automatic control for the technical systems], Moscow, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 1993. 492 p.

#### **Authors of the publication**

**Andrei V. Logunov** – graduate student of the Department of Electric Power Engineering, FSBEI HE Tyumen Industrial University.

**Yuri K. Shlyk** – Dr. Tech. sciences, associate professor, professor of the Department of Electric Power Engineering, FSBEI HE «Tyumen Industrial University.»

*Шифр научной специальности: 2.4.3 «Электроэнергетика»*

*Смежные специальности в рамках группы научной специальности: 2.4.2, 2.4.1*

**Получено 25.04.2023 г.**

**Отредактировано 23.05.2023 г.**

**Принято 31.05.2023 г.**