

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-35-44>

УДК 620.92

Определение мест повреждения изоляции неоднородной линии электроснабжения

А. М. Олейников¹⁾, Л. Н. Канов²⁾

¹⁾Институт природно-технических систем (Севастополь, Российская Федерация),

²⁾Севастопольский государственный университет (Севастополь, Российская Федерация)

Реферат. Целью исследования явилась разработка алгоритма реализации точного определения места и характера повреждения изоляции на линии электроснабжения, основу которого составляет математическая модель режима электрической сети на основе теории электрических цепей с распределенными параметрами. Достижение этой цели построено на анализе и математическом описании схем замещения распределительной линии с двумя центрами питания в стационарном режиме с известными коэффициентами распространения и волновыми сопротивлениями и в режиме с повреждением. Подробно описаны уравнения модели, на примере расчета типичных режимов распределительной линии длиной 50 км небольшой мощности с двумя центрами питания продемонстрирована возможность оперативно, в режиме текущего времени получить координату вероятного повреждения изоляции и оценить степень повреждения, а признаком аварийного режима послужило отклонение напряжения на выходах центров питания. В целом рассмотренный способ расчета режима распределительной линии электроэнергетической системы переменного тока позволяет в оперативном режиме отслеживать появление повреждений или несанкционированное подключение нагрузки с целью отбора мощности, при этом данная методика пригодна и для анализа линии с единственным центром питания, а также позволяет оперативно регулировать напряжение источников для управления мощностью нагрузки на необходимом уровне. Перспективным направлением дальнейших исследований может быть распространение методики на разветвленные линии с несколькими ответвлениями нагрузок и центрами питания, что характерно, например, для оффшорных электроэнергетических систем. Кроме того, на рассматриваемой модели может быть построена система контроля изоляции и избирательной защиты разветвленных нагрузок.

Ключевые слова: электрическая сеть, потребители, аварийный участок, напряжение, ток, мощность, математическое моделирование, сопротивление изоляции, холостой ход, короткое замыкание

Для цитирования: Олейников, А. М. Определение мест повреждения изоляции неоднородной линии электроснабжения / А. М. Олейников, Л. Н. Канов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 1. С. 35–44. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-35-44>

Адрес для переписки

Олейников Александр Михайлович
Севастопольский институт
природно-технических систем
ул. Ленина, 28,
299011, г. Севастополь, Российская Федерация
Тел.: +7 8692 54-40-10
ipts-sevastopol@mail.ru

Address for correspondence

Oleynikov Alexander M.
Institute of Natural
and Technical Systems
28, Lenin str.,
299011, Sevastopol, Russian Federation
Тел.: +7 8692 54-40-10
ipts-sevastopol@mail.ru

Determination of Insulation Fault Locations in a Heterogeneous Power Supply Line

A. M. Oleynikov¹, L. N. Kanov²

¹Institute of Natural and Technical Systems (Sevastopol, Russian Federation),

²Sevastopol State University (Sevastopol, Russian Federation)

Abstract. The purpose of the study was to develop an algorithm for the implementation of an accurate determination of the location and nature of insulation fault on the power supply line, which foundation is a mathematical model of the electrical network mode based on the theory of electrical circuits with distributed parameters. The achievement of this goal is based on the analysis and mathematical description of the replacement circuits of a distribution line with two power centers in the stationary mode with known propagation constants and wave impedances and in a fault mode. The equations of the model are described in detail, using the example of calculating typical modes of a 50 km long low-power distribution line with two power centers, it is demonstrated that it is possible to quickly, in the current time mode, obtain the coordinate of probable insulation fault and assess the degree of it, while an indication of an emergency mode was a voltage deviation at the outputs of the power centers. In general, the method for calculating the mode of the distribution line of an alternating current electric power system under consideration allows quick monitoring of damage or unauthorized connection of the load for the purpose of power take-off, while this technique is also suitable for analyzing a line with a single power supply center, and also makes it possible to quickly adjust the voltage of sources to control the load power at the required level. A promising area for further research may be the extension of the technique to branched lines with several load branches and power centers, which is typical, for example, for offshore electric power systems. In addition, a system for monitoring isolation and selective protection of branched loads can be built on the model under consideration.

Keywords: electrical network, consumers, emergency section, voltage, current, power, mathematical modeling, insulation resistance, idle, short circuit

For citation: Oleynikov A. M., Kanov L. N. (2025) Determination of Insulation Fault Locations in a Heterogeneous Power Supply Line. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (1), 35–44. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-35-44> (in Russian)

Введение

Приоритетным направлением развития современной электроэнергетики является повышение надежности транспортировки электроэнергии [1–5]. В [6–9] были предложены параметрические и графоаналитические методы оперативного анализа повреждений в электрических сетях. В настоящее время этот вопрос решается путем использования пунктов сетевого секционирования за счет локализации и отключения небольшой части сети, в пределах которой произошло повреждение [10–12]. Так как зоны подсоединения потребителей могут быть неравномерно распределены по линии, место аварии, определяемое обычно применяемыми методами, представляется чаще всего номерами точек подключения потребителей [10, 13], однако при значительном расстоянии между точками подключения актуальной остается задача точного определения места повреждения внутри предполагаемого аварийного участка.

В [11] решение этой задачи проведено с применением программного комплекса Wolfram Mathematica, однако предлагаемый там подход создает сложности, связанные с неоднозначностью результатов решения. Целью

настоящей статьи является разработка алгоритма точного определения места и характера аварии на распределительной линии на основании измерения напряжений и токов на центрах питания и нагрузках. Основу алгоритма составляет математическое моделирование режима распределительной линии на основе теории линейных электрических цепей с распределенными параметрами [13–15]. Такая модель позволяет точно определить место аварии и сопротивление поврежденной изоляции.

Математическое описание распределительной линии с повреждением

Рассмотрим произвольную неоднородную распределительную линию электроснабжения длиной L с двумя центрами питания (рис. 1), которые обеспечивают нагрузку по двум участкам линии ad и db с длинами x_H и $L - x_H$ и с удельными параметрами $\underline{Z}_{B1}, \gamma_1; \underline{Z}_{B2}, \gamma_2$. В точке с координатой x_K имеет место повреждение изоляции с сопротивлением \underline{Z}_K . Обе эти величины подлежат определению. Расстояния x_1, x_3, x_2 по линии отсчитываются слева направо; в точке a расстояние $x_1 = 0$; в точке повреждения c : $x_1 = x_K = ?, x_3 = 0$; в точке d : $x_3 = x_H, x_2 = 0$; в точке b : $x_2 = L - x_H$.

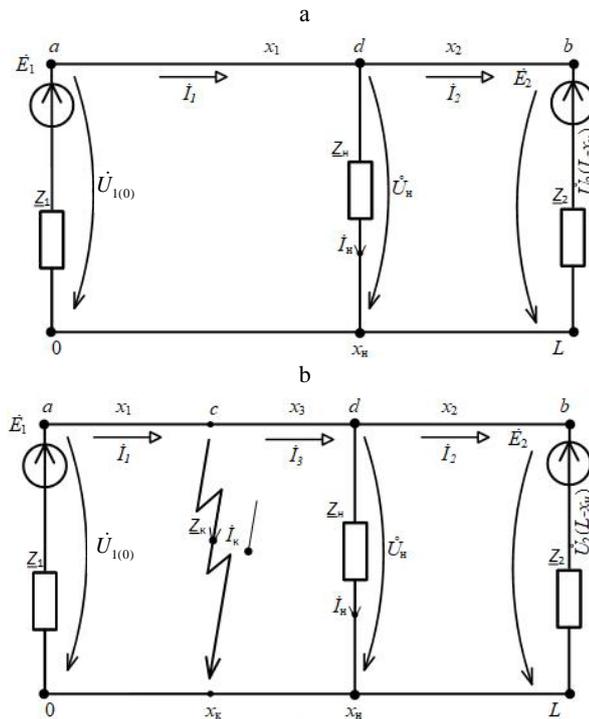


Рис. 1. Распределительная линия с двумя центрами питания:
 а – линия в стационарном режиме под нагрузкой; б – то же с повреждением

Fig. 1. Distribution line with two power centers:
 a – the line in stationary mode under load; b – the damaged line

Рабочий режим системы определяется эквивалентными ЭДС \dot{E}_1, \dot{E}_2 , сопротивлениями $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_H$ и напряжениями $\dot{U}_{1(0)}, \dot{U}_{2(L-x_H)}$. При повреждении в зоне $c - x_K$ напряжение в конце первого участка $\dot{U}_{1(0)}$ и $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ в конце линии изменяются по сравнению с рабочим режимом, но остаются доступными измерению.

Каждый из рассматриваемых участков описывается парой комплексных дифференциальных уравнений [10, 11]:

$$-\frac{d\dot{U}}{dx} = (r + j\omega L)\dot{I}; \quad -\frac{d\dot{I}}{dx} = (g + j\omega C)\dot{U},$$

которые дифференцированием по x сводятся к уравнениям второго порядка:

$$-\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} = \underline{\gamma}^2\dot{U}; \quad -\frac{d^2\dot{I}}{dx^2} = \underline{\gamma}^2\dot{I}$$

с решениями вида:

$$\dot{U}(x) = \underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}; \quad \dot{I}(x) = \frac{\underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} - \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}}{\underline{Z}_B},$$

где $\underline{\gamma} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)}$ – коэффициент распространения; $\underline{Z}_B =$

$= \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}}$ – волновое сопротивление; r, g, L, C – первичные удельные

параметры линий; $\underline{A}_1, \underline{A}_2$ – комплексные постоянные интегрирования, также подлежащие определению.

Для каждого из трех получившихся участков системы совокупность решений имеет вид [10, 11]:

$$\dot{U}_i(x_i) = \underline{A}_{i1} e^{-\underline{\gamma}_i x_i} + \underline{A}_{i2} e^{\underline{\gamma}_i x_i}; \quad \dot{I}_i(x_i) = \frac{\underline{A}_{i1} e^{-\underline{\gamma}_i x_i} - \underline{A}_{i2} e^{\underline{\gamma}_i x_i}}{\underline{Z}_{Bi}} \quad (1)$$

при $i = 1, 2, 3$; $\underline{\gamma}_1 = \underline{\gamma}_3$; $\underline{Z}_{B1} = \underline{Z}_{B3}$.

Аргументы напряжений и токов изменяются в пределах: для x_1 : $0 \dots x_K$; для x_3 : $0 \dots x_H - x_K$; для x_2 : $0 \dots x_H$. Задача, таким образом, заключается в определении расстояния x_K до точки аварии и сопротивления утечки поврежденной изоляции \underline{Z}_K . Анализ следует начинать, когда измерения напряжений $\dot{U}_{1(0)}$ в начале первого участка и $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ в конце второго участка изменятся по сравнению с обычным стационарным режимом, что и свидетельствует об аварийной ситуации. Полагаем, что сопротивление нагрузки \underline{Z}_H не изменилось или доступно измерению.

Предварительно в стационарном штатном режиме должны быть заранее определены коэффициенты распространения $\underline{\gamma}_1, \underline{\gamma}_2$ и волновые сопротивления $\underline{Z}_{B1}, \underline{Z}_{B2}$ по соотношениям [11]:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\underline{Z}_{XX} \underline{Z}_{K3}}; \text{th } \gamma l = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{K3}}{\underline{Z}_{XX}}},$$

где l – длина участка линии; $\underline{Z}_{XX}, \underline{Z}_{K3}$ – входные сопротивления участков линии, определяемые по результатам предварительного измерения напряжения, тока и мощности участка линии в режиме холостого хода и короткого замыкания в условиях полного отсоединения от энергосистемы.

При штатной эксплуатации непрерывно измеряются напряжение $\dot{U}_{1(0)}$ на входе участка линии 1 и напряжение $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ в точке b участка линии 2. Возникшие отклонения этих напряжений от их обычных значений и говорят о возникшем повреждении линии.

Определение точки повреждения и сопротивления утечки

Анализ выполним по результатам решения уравнений рассматриваемых участков линий (1) на основе граничных условий на концах этих участков. Если в начале первого участка измерено напряжение $\dot{U}_{1(0)}$, то в точке a граничное условие получаем в виде $\dot{E}_1 = \dot{U}_{1(0)} + \dot{I}_{1(0)} \underline{Z}_1$, а значения \underline{A}_{11} и \underline{A}_{12} определяются из пары уравнений:

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_{1(0)} + (\underline{A}_{11} - \underline{A}_{12}) \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{B1}}; \dot{U}_{1(0)} = \underline{A}_{11} + \underline{A}_{12}. \quad (2)$$

Решение уравнений (2) дает:

$$\underline{A}_{12} = 0,5 \left[\dot{U}_{1(0)} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{B1}}{\underline{Z}_1} + 1 \right) - \frac{\underline{Z}_{B1} \cdot \dot{E}_1}{\underline{Z}_1} \right]; \underline{A}_{11} = \dot{U}_{1(0)} - \underline{A}_{12}.$$

Аналогично уравнению (2) в конце второй линии при измерении напряжения $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ имеем $\dot{E}_2 = \dot{U}_{2(L-x_H)} - \dot{I}_{2(L-x_H)} \underline{Z}_2$, а пара уравнений для определения \underline{A}_{21} и \underline{A}_{22} принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} \left[\dot{E}_2 - \dot{U}_{2(L-x_H)} \right] \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} &= -\underline{A}_{21} e^{-\gamma_{2(L-x_H)}} + \underline{A}_{22} e^{\gamma_{2(L-x_H)}}; \\ \dot{U}_{2(L-x_H)} &= \underline{A}_{21} e^{-\gamma_{2(L-x_H)}} + \underline{A}_{22} e^{\gamma_{2(L-x_H)}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

откуда получаем:

$$\underline{A}_{22} = 0,5 \left[\dot{E}_2 \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} + \dot{U}_{2(L-x_H)} \left(1 - \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} \right) \right] e^{-\gamma_{2(L-x_H)}};$$

$$\underline{A}_{21} = -0,5 \left[\dot{E}_2 \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} - \dot{U}_{2(L-x_H)} \left(1 + \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} \right) \right] e^{\gamma_{2(L-x_H)}}.$$

В узле d равны напряжения в начале участка 2 и в конце участка 3, а ток в конце участка 3 разделяется на ток в начале участка 2 и ток в нагрузке:

$$\dot{U}_{3(x_H-x_K)} = \dot{U}_{2(0)}; \quad \dot{I}_{3(x_H-x_K)} = \frac{\dot{U}_{2(0)}}{\underline{Z}_H} + \dot{I}_{2(0)}.$$

Поэтому уравнения для \underline{A}_{31} и \underline{A}_{32} принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{A}_{31}e^{-\gamma_{3(x_H-x_K)}} + \underline{A}_{32}e^{\gamma_{3(x_H-x_K)}} &= \underline{A}_{21} + \underline{A}_{22}; \\ \underline{A}_{31}e^{-\gamma_{3(x_H-x_K)}} - \underline{A}_{32}e^{\gamma_{3(x_H-x_K)}} &= \underline{A}_{21} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}} \right) + \underline{A}_{22} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

откуда:

$$\begin{aligned} \underline{A}_{31} &= 0,5e^{\gamma_{3(x_H-x_K)}} (\underline{A}_{21}\underline{B}_1 + \underline{A}_{22}\underline{B}_2); \\ \underline{A}_{32} &= 0,5e^{-\gamma_{3(x_H-x_K)}} (\underline{A}_{21}\underline{B}_3 + \underline{A}_{22}\underline{B}_4). \end{aligned} \quad (5)$$

Для краткости в (5) обозначены: $\underline{B}_1 = 1 + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}}$; $\underline{B}_2 = 1 + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}}$;

$$\underline{B}_3 = 1 - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}}; \quad \underline{B}_4 = 1 - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}}.$$

Таким образом, все комплексные постоянные решений уравнения (1) определены.

Теперь на основании граничных условий в точке c повреждения определим расстояние до этой точки x_K и сопротивление изоляции в этой точке \underline{Z}_K . В точке c равны напряжения в начале третьего участка и в конце первого участка, а ток в конце первого участка разделяется на ток в начале третьего участка и ток утечки:

$$\dot{U}_{1(x_K)} = \dot{U}_{3(0)}; \quad \dot{I}_{1(x_K)} = \frac{\dot{U}_{3(0)}}{\underline{Z}_K} + \dot{I}_{3(0)}.$$

Выражения для нахождения x_K и \underline{Z}_K принимают вид:

$$\underline{A}_{11}e^{-\gamma_{1x_K}} + \underline{A}_{12}e^{\gamma_{1x_K}} = \underline{A}_{31} + \underline{A}_{32}; \quad (6)$$

$$(\underline{A}_{11}e^{-\gamma_{1x_K}} - \underline{A}_{12}e^{\gamma_{1x_K}}) \cdot \frac{1}{\underline{Z}_{B1}} = (\underline{A}_{31} + \underline{A}_{32}) \cdot \frac{1}{\underline{Z}_K} + (\underline{A}_{31} - \underline{A}_{32}) \cdot \frac{1}{\underline{Z}_{B3}}. \quad (7)$$

Теперь, подставив \underline{A}_{31} , \underline{A}_{32} из выражений (5) в формулу (6), получаем выражение для расстояния x_K : $x_K = \frac{1}{\underline{\gamma}_1} \ln \underline{y}$, где обозначено

$$\underline{y} = \left[\frac{\underline{A}_{11} - 0,5e^{\underline{\gamma}_1 x_H} \cdot (\underline{A}_{21} \underline{B}_1 + \underline{A}_{22} \underline{B}_2)}{-\underline{A}_{12} + 0,5e^{-\underline{\gamma}_1 x_H} \cdot (\underline{A}_{21} \underline{B}_3 + \underline{A}_{22} \underline{B}_4)} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Аналогично, подставив \underline{A}_{31} , \underline{A}_{32} в формулу (7), получим значение для поврежденного сопротивления изоляции $\underline{Z}_K = \underline{Z}_{B1} \frac{\underline{A}_{31} + \underline{A}_{32}}{\frac{\underline{A}_{11}}{\underline{y}} - \underline{A}_{12} \cdot \underline{y} - \underline{A}_{31} + \underline{A}_{32}}$.

Вышеприведенные результаты для комплексных постоянных интегрирования и сопротивления \underline{Z}_K на основании измерения напряжений в начале первого участка $\dot{U}_1(0)$ и в конце второго \underline{A}_{11} , ..., \underline{A}_{32} , x_K участка $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ позволяют оперативно, в режиме текущего времени получить координату возможного повреждения изоляции и оценить степень повреждения.

Расчетная оценка результатов

Для оценки приведем результаты расчетов распределительной линии длиной 50 км небольшой мощности с двумя центрами питания: $\dot{E}_1 = 220$ В, $\dot{E}_2 = 225e^{j0,1}$ В и $\underline{Z}_1 = 0,5 + j3$ Ом, $\underline{Z}_2 = 0,4 + j2,5$ Ом и с параметрами линии: $\underline{Z}_{B1} = 77,13 - j61,11$ Ом, $\underline{Z}_{B2} = 80,12 - j60,1$ Ом; $\underline{\gamma}_1 = 5,335e^{j1,894} \cdot 10^{-3}$, $\underline{\gamma}_2 = 6,34e^{j1,99} \cdot 10^{-3}$. В точке $x_H = 35$ км включена нагрузка $\underline{Z}_H = 48$ Ом с напряжением $\dot{U}_H = 214,71e^{-j0,077}$ В. Стационарные напряжения на центрах питания: $\dot{U}_1 = 219,93e^{-j0,00945}$ В, $\dot{U}_2 = 222,8e^{j0,064}$ В.

На рис. 2 изображены графики распределения действующих значений напряжения и тока на участках линии в обычном стационарном режиме. Как видно, напряжение вдоль линии непрерывно изменяется с минимумом в точке d (рис. 1) подключения нагрузки. График тока имеет разрыв, величина которого соответствует действующему значению тока нагрузки. Большая часть тока нагрузки потребляется из второго центра питания.

Результаты расчета аварийного режима линии приведены на рис. 3. Признаком аварийного режима послужили измеренные напряжения на выходах центров питания: $\dot{U}_1 = 190,07e^{-j0,112}$ В, $\dot{U}_2 = 204,2e^{j0,03}$ В. Расчеты по выражениям (2)–(7) дают значения постоянных $\underline{A}_{11} = 151,69 - j617,35$,

$\underline{A}_{12} = 37,19 + j596,11$, $\underline{A}_{21} = -44,2 + j478,91$, $\underline{A}_{22} = 196,78 - j530,35$, $\underline{A}_3 = \bar{\pi} = 11,92 + j344,43$, $\underline{A}_{32} = 57,26 - j418,71$. Параметры аварийного режима: сопротивление утечки изоляции $\underline{Z}_K = 4,98$ Ом произошло в точке $x_K = 20,017$ км, ток и напряжение в точке утечки составляют $\dot{I}_K = 20,3e^{-j0,82}$ А, $\dot{U}_K = 101,51e^{-j0,82}$ В. Напряжение и ток нагрузки вследствие утечки существенно уменьшились: $\dot{U}_H = 135,7e^{-j0,39}$ В, $\dot{I}_H = 2,82e^{-j0,39}$ А.

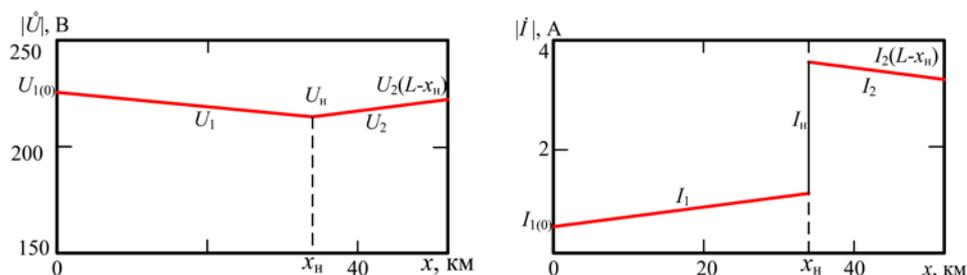


Рис. 2. Стационарный режим работы линии: а – напряжения вдоль линии; б – токи
Fig. 2. Stationary mode of line operation: a – voltages along the line; b – currents

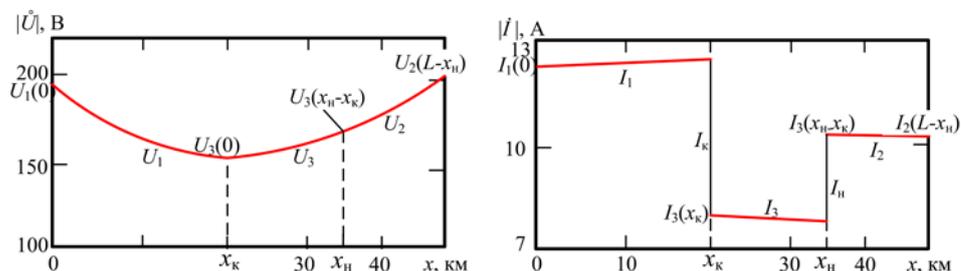


Рис. 3. Аварийный режим линии: а – напряжения вдоль линии; б – токи
Fig. 3. Emergency mode of the line: a – voltages along the line; b – currents

ВЫВОДЫ

1. Предложенный способ расчета режима распределительной линии электроэнергетической системы переменного тока позволяет в оперативном режиме отслеживать появление повреждений или несанкционированное подключение нагрузки с целью отбора мощности. Методика пригодна также для анализа линии с единственным центром питания, например при $\dot{E}_2 = 0$, $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{H2}$, и позволяет оперативно регулировать напряжение источников для управления мощностью нагрузки на необходимом уровне.

2. Перспективным направлением дальнейших исследований может быть распространение методики на разветвленные линии с несколькими

ответвлениями нагрузок и центрами питания, что характерно, например, для оффшорных электроэнергетических систем. Кроме того, на рассматриваемой модели может быть построена система контроля изоляции и избирательной защиты разветвленных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические системы. Электрические сети / В. А. Веников [и др.]. М.: Высш. шк., 1998. 511 с.
2. Аржанников, Е. А. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, А. М. Чухин. М.: Энергопресс, 1998. 87 с.
3. Дементьев, В. С. Определение места повреждения силовых кабельных линий / В. С. Дементьев, В. К. Спиридонов, Г. М. Шалыт. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962. 346 с.
4. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт. М.: Энергоатомиздат, 1982. 312 с.
5. Данилов, М. И. Оперативная идентификация сопротивлений проводов распределительных сетей 380 В автоматизированными системами учета / М. И. Данилов, И. Г. Романенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 2. С. 124–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-124-140>.
6. Качесов, В. Е. Параметрический метод определения расстояния до места повреждения в распределительных сетях / В. Е. Качесов, В. Ю. Лавров, А. Б. Черепанов // Электрические станции. 2003. № 8. С. 37–43.
7. Байбурин, Э. Р. Метод оперативного определения места повреждения электрической сети напряжением 6 (10) – 35 кВ / Э. Р. Байбурин // Нефтегазовое дело. 2006. № 2. С. 127. URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Bayburin/Bayburin_1.pdf.
8. Сазыкин, В. Г. Графоаналитический метод определения оптимального места расположения пункта сетевого секционирования / В. Г. Сазыкин // Изв. вузов. Электромеханика. 2022. Т. 65, № 4. С. 86–96. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-86-96>.
9. Баламетов, А. Б. Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса / А. Б. Баламетов, Э. Д. Халилов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>.
10. Шлык, Ю. К. Установившийся режим работы кабельной линии с локальной неоднородностью / Ю. К. Шлык, А. В. Логунов // Промышленная энергетика. 2022. № 7. С. 2–9. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.40.77.001>.
11. Логунов, А. В. Разработка модели кабельной линии с повреждением на основе теории четырехполюсников с переменной топологией / А. В. Логунов, Ю. К. Шлык // Изв. вузов. Электромеханика. 2023. Т. 66, № 3. С. 48–54. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2023-3-48-54>.
12. Повышение достоверности определения зоны короткого замыкания на линиях 6–35 кВ / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14>.
13. Романюк, Ф. А. Определение зоны повреждения по уровню токов короткого замыкания / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик, М. А. Шевалдин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 396–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-396-407>.
14. Каганов, З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З. Г. Каганов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
15. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. М.: Юрайт, 2012. 701 с.

Поступила 02.09.2024 Подписана в печать 11.11.2024 Опубликовано онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Venikov V. A., Glazunov A. A., Zhukov L. A. [et al.] (1998) *Electrical Systems. Electrical Networks*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 511 (in Russian).
2. Arzhannikov E. A., Chukin A. M. (1998) *Methods and Devices for Determining Damage Sites on Power Transmission Lines*. Moscow, Energopress Publ. 87 (in Russian).
3. Dement'ev V. S., Spiridonov V. K., Shalyt G. M. (1962) *Determining the Location of Damage to Power Cable Lines*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 346 (in Russian).
4. Shalyt G.M. (1982) *Determining Damage Sites in Electrical Network*. Moscow, Energoizdat Publ. 312 (in Russian).
5. Danilov M. I., Romanenko I. G. (2023) Operational Identification of Resistances of Wires of 380 V Distribution Networks by Automated Accounting Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (2), 124–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-124-140> (in Russian).
6. Kachesov V. E., Lavrov V. Y., Cherepanov A. B. (2003) Parametric Method of Fault Location in Distribution Networks. *Power Technology and Engineering*, 37 (4), 262–268. <https://doi.org/10.1023/A:1026394109095>.
7. Baiburin E. R. (2006) The Method of Operational Determination of the Location of Damage to the Electrical Network with a Voltage of 6(10) – 35 kV. *Neftegazovoe Delo = Petroleum Engineering*, (2), 127. Available at: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Bayburin/Bayburin_1.pdf (in Russian).
8. Sazykin V. G., Bagmetov A. A. (2022) Grapho-Analytical Method for Determining the Optimal Location of the Network Sectioning Unit. *Russian Electromechanics*, 65 (4), 86–96. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-86-96>.
9. Balametov A. B., Halilov E. D. (2020) Simulation of Electric Networks Modes Using Steady-State and Heat Balance Equations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80> (in Russian).
10. Shlyk Y. K., Logunov A. V. (2022) Steady Mode of Operation of a Cable Line with Local Inhomogeneity, *Promyshlennaya Energetika = Industrial Power Engineering*, (7), 2–9. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.40.77.001> (in Russian).
11. Logunov A. V., Shlyk Y. K. (2023). Developing a Cable Line Model with a Fault Based on the Theory of Four-Poles with Variable Topology. *Russian Electromechanics*, 66 (3), 48–54. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2023-3-48-54> (in Russian).
12. Romaniuk F. A., Bulochyk E. V., Huryanchyk O. A., Kachenya V. S. (2018) The Reliability of Determining the Short Circuit Zone of the Lines of 6–35 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 5–14. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14 (in Russian).
13. Romaniuk F. A., Bulochyk E. V., Shevaldin M. A. (2018) Determination of the Fault Zone by the Level of Short-Circuit Currents. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 396–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-396-407> (in Russian).
14. Kaganov Z. G. (1990) *Electric Circuits with Distributed Parameters and Chain Circuits*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 248 (in Russian).
15. Bessonov L. A. (2012) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electric Circuits*. Moscow, Yurayt Publ. 701 (in Russian).

Received: 02 September 2024 Accepted: 11 November 2024 Published online: 31 January 2025