

УДК 621.316.925

## ЛОКАЦИЯ ЗАМЫКАНИЯ В ДЛИННОЙ ЛИНИИ ПО ВЕЛИЧИНАМ ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА

© 2019 г. А. А. Беянин<sup>1</sup>, \*, Ю. Я. Лямец<sup>1</sup>, А. Ю. Чернов<sup>2</sup><sup>1</sup>ООО “Релематика”, Чебоксары, Россия<sup>2</sup>Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

\*e-mail: a.a.beyanin@gmail.com

Поступила в редакцию 08.04.2019 г.

После доработки 08.08.2019 г.

Принята к публикации 12.08.2019 г.

Локация замыкания рассматривается как один из результатов алгоритмического наблюдения длинной линии – процедуры формирования электрических величин в любом предполагаемом месте повреждения. Инструментом преобразования физически наблюдаемых величин в алгоритмические служит модель неповрежденного участка линии между местом физического наблюдения и произвольным ее местом (алгоритмическая модель). К настоящему времени детально исследованы различные аспекты алгоритмического наблюдения линии электропередачи в базе комплексных величин. Здесь рассматриваются специфические особенности алгоритмического наблюдения быстрозатухающего переходного процесса в длинной линии, несущие информацию о месте однофазного замыкания на землю в фидере распределительной сети. Алгоритмическая модель длинной линии описывается разностными уравнениями. Мгновенные значения выходных величин алгоритмической модели образуют вектор, годографу которого присуща закономерность, помогающая обнаружить место замыкания.

*Ключевые слова:* алгоритмическая модель, наблюдение, электропередача, место замыкания

DOI: 10.1134/S0002331019040046

Переходные процессы несут информацию о повреждении наблюдаемого энергообъекта; получение и применение такой информации составляет задачу релейной защиты [1]. Переходные процессы в длинных линиях отличаются своеобразием математического описания и физических представлений. Имеются два подхода – волновой и спектральный [2]. Волновой подход приводит к разностным уравнениям (уравнения Бергерона), а в более общем плане – к дифференциально-разностным [3–5]. Спектральный подход приводит к уравнениям длинной линии на спектральных компонентах и к цифровому спектральному анализу наблюдаемых величин [6, 7].

Наибольшую сложность представляет получение информации по результатам наблюдения кратковременного переходного процесса однофазного замыкания на землю в распределительной сети. Замыкание, как физическое явление, представляет собой диссипативный процесс. Модель замыкания – резистивный двухполюсник, в общем случае нелинейный с неопределенной характеристикой. Наблюдателю, не располагающему никакой иной информацией о случившемся повреждении контролируемой сети, надлежит определить место подключения к фидеру неизвестного резистивного элемента. В сети с изолированной нейтралью однофазное замыкание на землю сопровождается кратковременным интенсивным переходным процессом. Токи и напряже-

ния, зафиксированные в это время, наряду с априорной информацией о первичных параметрах фидера, составляют информационную базу наблюдателя – локатора замыкания. Процедура локации связана с математическим оформлением физических предпосылок, т.е. в придании им формы конкретного критерия, отражающего свойства места замыкания. Заметим, что ранее удалось представить в такой форме критерий контроля во времени нелинейного элемента, столь же недоступного наблюдению, как и место замыкания, – ветви намагничивания трансформатора [8].

**Граничные условия в месте замыкания.** На рис. 1а иллюстрируется случай замыкания на землю фазы  $A$  в месте с координатой  $x_f$ ;  $u_{Af}$ ,  $i_{Af}$  – напряжение и ток замыкания. Кроме них показаны наблюдаемые напряжения и токи  $u_{vf}$ ,  $i_{vf}$ ,  $v = A, B, C$ . Наблюдаемая сторона фидера обозначена символом  $s$ , ненаблюдаемая –  $r$ .

В месте замыкания напряжение и ток связаны условием диссипативности

$$\text{sign}u_{Af}(t) = \text{sign}i_{Af}(t), \quad (1)$$

которое говорит о том, что мгновенная мощность замыкания не может быть отрицательной

$$p_{Af}(t) = u_{Af}(t)i_{Af}(t) \geq 0. \quad (2)$$

Имеется еще одна интерпретация условия (1), отличающаяся высокой наглядностью. Образуем двумерный вольт-амперный вектор  $\mathbf{w}$  с элементами  $u, i$

$$\mathbf{w}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ i(t) \end{bmatrix}.$$

На плоскости  $u, i$  или в пространстве с координатами  $u, i, t$  вектор  $\mathbf{w}(t)$  описывает годограф. Вектор места замыкания  $\mathbf{w}_{Af}(t) = [u_{Af}(t), i_{Af}(t)]^T$  на плоскости  $u, i$  описывает кривую, которая в соответствии с условием (1) располагается в первом и третьем квадрантах, не заходя во второй и четвертый.

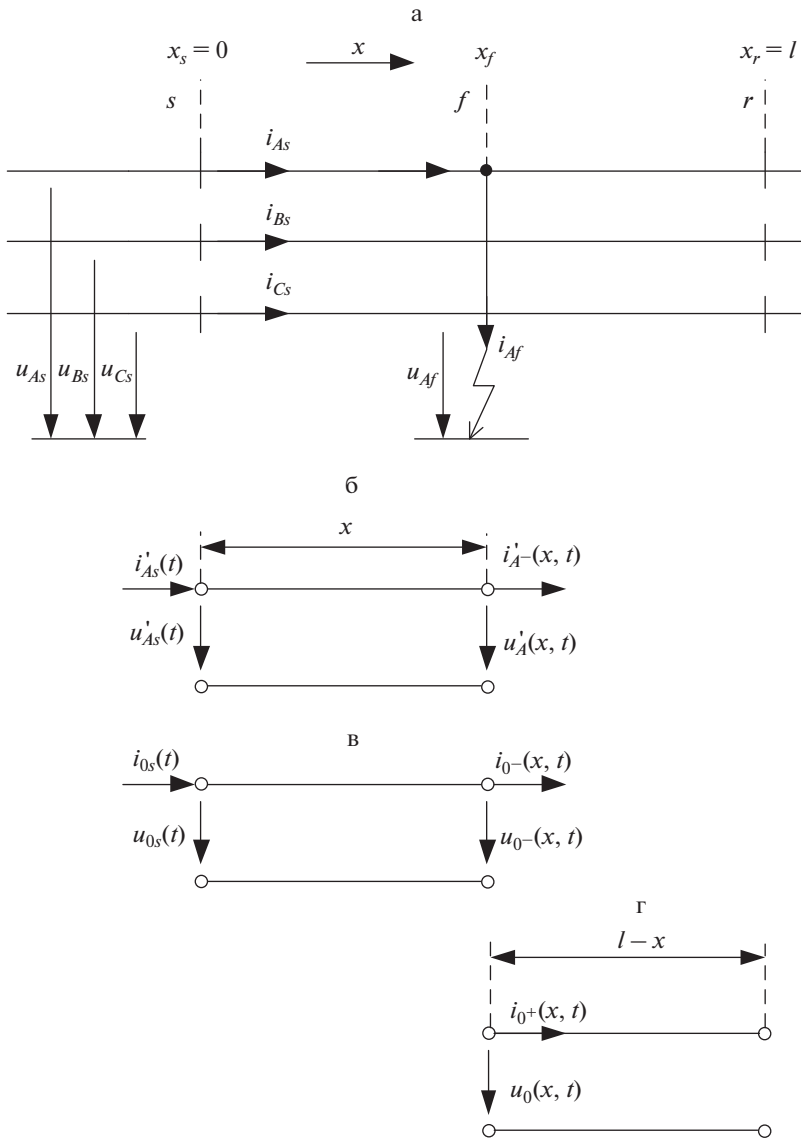
Еще одно граничное условие касается составляющих тока  $i_{Af}$  – нулевой  $i_{0f}$  и безнулевой  $i'_{Af} = i_{Af} - i_{0f}$ . В месте замыкания они пропорциональны

$$i_{Af}(t) = 3i_{0f}(t) = 1.5i'_{Af}(t). \quad (3)$$

**Алгоритмическая модель фидера.** Любое место фидера с координатой  $x$  интерпретируется наблюдателем как предполагаемое место повреждения. Алгоритмическая модель выстраивается для предположительно неповрежденного участка от места наблюдения  $x_s$  до точки  $x$  (рис. 1б, 1в) и выполняет преобразование величин  $u'_{As}(t)$ ,  $i'_{As}(t)$ ,  $u_{0s}(t)$ ,  $i_{0s}(t)$  места наблюдения в напряжения  $u'_A(x, t)$ ,  $u_0(x, t)$  и токи  $i'_{A-}(x, t)$ ,  $i_{0-}(t)$ . Знак в индексе носит тот же смысл, что и в обозначениях  $i_{Af-}$ ,  $i_{Af+}$  на рис. 1, где знаки отличают продольные токи от поперечного тока  $i_f$ .

Фидер как длинная линия описывается разностными уравнениями, вид которых зависит от способа учета потерь [3]. Если учесть потери сосредоточенными сопротивлениями по концам участка линии длиной  $x$  (рис. 2), то участок получит следующее описание

$$\begin{aligned} u_1(t) - a_x i_1(t) &= u_2(t - \tau_x) - b_x i_2(t - \tau_x), \\ u_2(t) - a_x i_2(t) &= u_1(t - \tau_x) + b_x i_1(t - \tau_x), \end{aligned} \quad (4)$$



**Рис. 1.** Модели фидера: а – имитационная модель, б, в, г – каналы алгоритмической модели; б – безнулевых составляющих; в, г – нулевой последовательности, в – первой части фидера, г – второй.

где  $a_x = R_B + R^0 x/2$ ,  $b_x = R_B - R^0 x/2$ ;  $R_B = \sqrt{L^0/C^0}$  – волновое сопротивление линии,  $\tau_x = x\sqrt{L^0 C^0}$  – время пробега волны вдоль отрезка линии,  $R^0$ ,  $L^0$ ,  $C^0$  – первичные (удельные) параметры линии.

Из основных уравнений (4) следует описание алгоритмической модели [9]

$$u'_A(x, t) = (1/2R_{B1}) \left[ a_{1x} u'_{As}(t + \tau_{1x}) + b_{1x} u'_{As}(t - \tau_{1x}) - a_{1x}^2 i'_{As}(t + \tau_{1x}) + b_{1x}^2 i'_{As}(t - \tau_{1x}) \right], \quad (5)$$

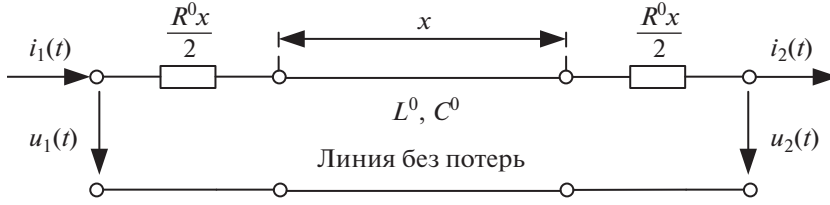


Рис. 2. Модель участка длинной линии при учете потерь вынесенными сопротивлениями.

$$i'_{A-}(x, t) = (1/2R_{B1}) \left[ -u'_{As}(t + \tau_{1x}) + u'_{As}(t - \tau_{1x}) - a_{1x}i'_{As}(t + \tau_{1x}) + b_{1x}i'_{As}(t - \tau_{1x}) \right], \quad (6)$$

$$u_0(x, t) = (1/2R_{B0}) \left[ a_{0x}u_{0s}(t + \tau_{0x}) + b_{0x}u_{0s}(t - \tau_{0x}) - a_{0x}^2i_{0s}(t + \tau_{0x}) + b_{0x}^2i_{0s}(t - \tau_{0x}) \right], \quad (7)$$

$$i_{0-}(x, t) = (1/2R_{B0}) \left[ -u_{0s}(t + \tau_{0x}) + u_{0s}(t - \tau_{0x}) - a_{0x}i_{0s}(t + \tau_{0x}) + b_{0x}i_{0s}(t - \tau_{0x}) \right], \quad (8)$$

где  $R_{B1} = \sqrt{L_1^0/C_1^0}$ ,  $R_{B0} = \sqrt{L_0^0/C_0^0}$  и  $\tau_{1x} = x\sqrt{L_1^0C_1^0}$ ,  $\tau_{0x} = x\sqrt{L_0^0C_0^0}$  – волновые сопротивления и времена пробега волны вдоль участка  $x$  в каналах прямой и нулевой последовательности;  $a_{1x} = R_{B1} + R_1^0 x/2$ ,  $b_{1x} = R_{B1} - R_1^0 x/2$ ,  $a_{0x} = R_{B0} + R_0^0 x/2$ ,  $b_{0x} = R_{B0} - R_0^0 x/2$ ;  $R_1^0$ ,  $L_1^0$ ,  $C_1^0$  и  $R_0^0$ ,  $L_0^0$ ,  $C_0^0$  – первичные параметры фидера прямой и нулевой последовательности.

Суммируясь, выходные сигналы каналов по рис. 1б, 1в определяют напряжение и ток в месте предполагаемого повреждения

$$u_A(x, t) = u'_A(x, t) + u_0(x, t), \quad (9)$$

$$i_{A-}(x, t) = i'_{A-}(x, t) + i_{0-}(x, t). \quad (10)$$

Что же касается тока предполагаемого места повреждения  $i_A(x, t)$ , то возможны два варианта его оценки. В первом случае принимается условие

$$i_A(x, t) \approx i_{A-}(x, t), \quad (11)$$

а во втором к произвольному месту  $x$  применяется граничное условие (3)

$$i_A(x, t) = 3(i_{0-}(x, t) - i_{0+}(x, t)),$$

что, правда, потребует отдельного определения тока  $i_{0+}(x, t)$  как реакции на напряжение  $u_0(x, t)$ .

**Информационные свойства годографа вольт-амперного вектора.** Наряду с критерием (1) инструментом распознавания становится двумерный вектор – функция времени и координаты

$$\mathbf{w}_A(x, t) = \begin{bmatrix} u_A(x, t) \\ i_A(x, t) \end{bmatrix}.$$

Годограф, описываемый им во времени на плоскости  $u, i$  для фиксированного места  $x$ , в общем случае заходит во все квадранты. Если  $Q_n$  и  $Q_ч$  – обозначения нечетных (первого и третьего) и четных (второго и четвертого) квадрантов, то данное обстоятельство отражается условием

$$\mathbf{w}_A(x, t) \in (Q_n, Q_ч). \quad (12)$$

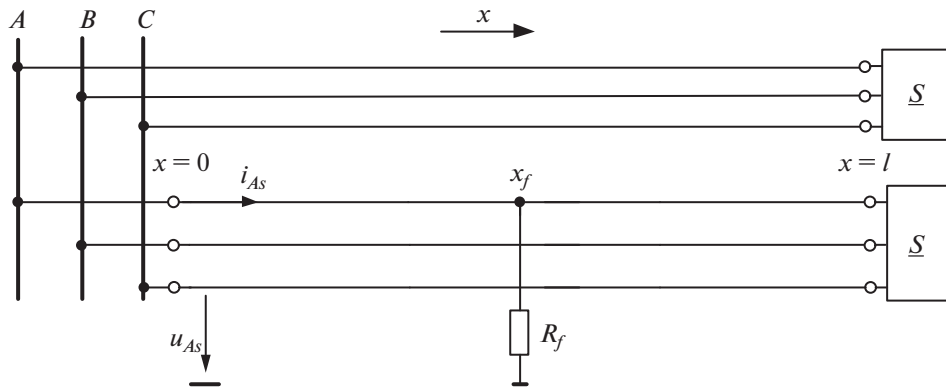


Рис. 3. Имитационная модель распределительной сети.

Критерий (1) говорит о том, что в месте замыкания условие (12) обходится без четных квадрантов

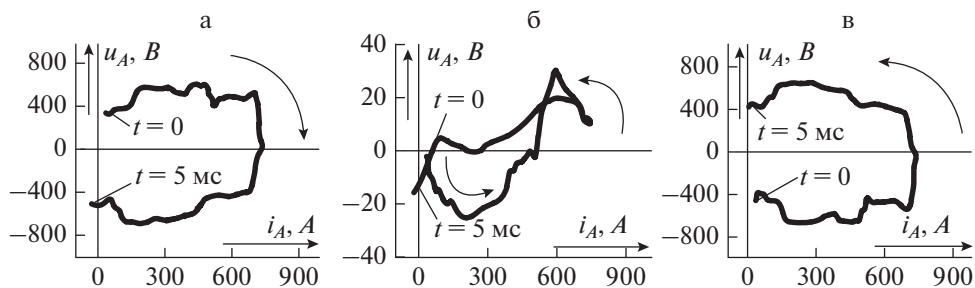
$$\mathbf{w}_A(x_f, t) \in Q_n.$$

Структура алгоритмической модели, формирующей вектор  $\mathbf{w}_A(x, t)$ , составленная для неповрежденного фидера (рис. 1б, 1в, 1г), неизменна при всех значениях  $x = 0..l$ . Поврежденному фидеру она адекватна только до неизвестного места  $x_f$ , т.е. при  $x = 0..x_{f-}$ . За этим местом ( $x = x_{f+}..l$ ) наступает полная неадекватность. В то же время, оценка тока предполагаемого места повреждения согласно допущению (11) несет в себе методическую погрешность. Естественно предположить, что такое положение вещей не может не отразиться на свойствах годографа, описываемого вектором  $\mathbf{w}_A(x, t)$ , однако должны сохраняться принципиальные различия между тем, как ведет себя годограф при  $x < x_f$  и при  $x > x_f$ . Прежде всего имеется в виду очередность смены одного квадранта другим, иначе говоря, движение вектора по часовой стрелке или против, а кроме того соотношение длительностей пребывания вектора в четных и нечетных квадрантах.

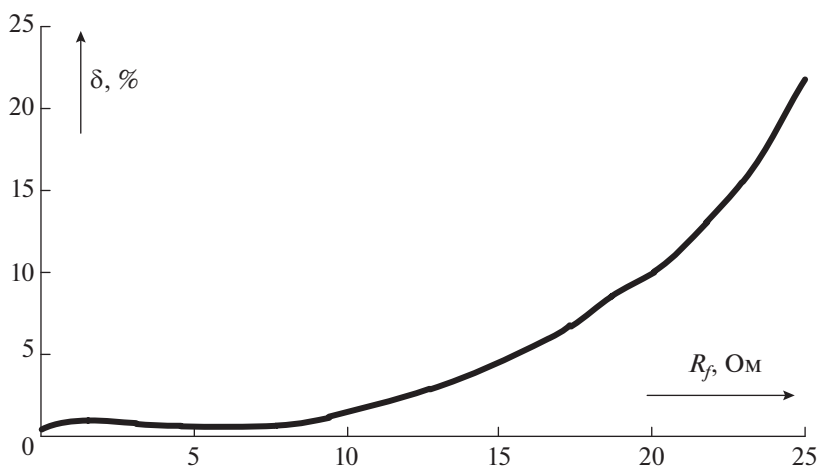
Рассмотрим в качестве примера замыкание в двухфидерной сети 35 кВ (рис. 3). Фидеры длиной  $l = 20$  км идентичны. Первичные параметры прямой последовательности  $R_1^0 = 0.14$  Ом/км,  $C_1^0 = 380$  нФ/км,  $L_1^0 = 0.194$  мГн/км, нулевой последовательности  $R_0^0 = 0.67$  Ом/км,  $C_0^0 = 400$  нФ/км,  $L_0^0 = 4.5$  мГн/км. Комплексная мощность нагрузки каждого фидера  $\underline{S} = 300$  кВт +  $j186$  кВАр. Имитировалось замыкание фазы А на землю в месте  $x_f = 10$  км через переходное сопротивление  $R_f = 0..25$  Ом.

На рис. 4 приведены годографы  $\mathbf{w}_A(x, t)$  при трех значениях координаты:  $x < x_f$ ,  $x = x_f$  и  $x > x_f$ , если применяется простое условие (11), а на рис. 5 – зависимость погрешности определения значения координаты  $x_f$  от величины переходного сопротивления  $\delta = (\hat{x}_f/x_f) - 1$ , где  $\hat{x}_f$  – значение  $x$ , при переходе через которое изменяется направление вращения вектора  $\mathbf{w}_A(x, t)$ . Наблюдаемые величины подвергались дискретизации с частотой 50 кГц.

Алгоритм автоматического определения направления движения годографа  $\mathbf{w}(t)$  основывается на закономерностях, присущих определенным типам движения. Если



**Рис. 4.** Годографы вольт-амперного вектора за первые 5 мс наблюдения процесса ОЗЗ: а –  $x = 9$  км, б –  $x = 10$  км, в –  $x = 11$  км.



**Рис. 5.** Погрешность определения места ОЗЗ

движение происходит по часовой стрелке (рис. 4а), то в нем стадии увеличения тока сменяется стадией понижения напряжения, за которой следует стадия снижения тока, а затем стадия повышения напряжения. На рисунке 4а эту четвертую стадию цикла не удастся увидеть, она оказалась за пределами окна наблюдения. Если же движение совершается против часовой стрелки (рис. 4в), то на смену стадии увеличения тока приходит стадия повышения напряжения, а на смену стадии снижения тока – стадия понижения напряжения, не попавшая в окно наблюдения на рис. 4в.

Закономерности чередования интервалов совпадения и несовпадения знаков напряжения и тока на выходе алгоритмической модели фидера до и после места замыкания ранее были описаны в [10]. Вольт-амперный вектор реализует критерий распознавания места замыкания в двумерном виде и в этом смысле уравнивает локацию в базе мгновенных величин с локацией в комплексном базисе синусоидального режима. Можно также заметить, что динамика вольт-амперного вектора интерпретирует метод локации более полно и в более общем виде, чем предыдущие двумерные представления критерия локации линии в базисе мгновенных значений [10, 11]. В информационном аспекте усматривается аналогия между годографом этого вектора и значением комплексной мощности на выходе алгоритмической модели в синусоидальном режиме.

## ВЫВОДЫ

1. Алгоритмическое наблюдение длинной линии является методом локации произошедшего в ней замыкания. Инструмент наблюдения – алгоритмическая модель, адекватная неповрежденной линии от места физического наблюдения до произвольного места предполагаемого повреждения.

2. Критерий локации базируется на физическом свойстве диссипативности замыкания и выражается через выходные величины алгоритмической модели. В базисе мгновенных значений напряжения и тока критерий допускает двумерное представление, как и в базисе комплексов синусоидального режима. Введенный в статье мгновенный вольт-амперный вектор своей динамикой характеризует состояние линии аналогично тому, как свидетельствует об этом комплексная мощность места замыкания в синусоидальном режиме.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Караев Р.И. Переходные процессы в линиях большой протяженности. М.: Энергия, 1978.
3. Караев Р.И., Лямец Ю.Я. О применении разностных уравнений длинной линии. Электричество, 1972. № 11. С. 28–36.
4. Караев Р.И., Лямец Ю.Я. Дифференциально-разностные уравнения волнового процесса в длинной линии. Изв. АН СССР. Энергетика и трансп. 1973. № 3. С. 132–138.
5. Лямец Ю.Я. Слагаемые свободного процесса в длинной линии. Изв. АН СССР. Энергетика и трансп. 1978. № 1. С. 11–17.
6. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Нудельман Г.С. Оптимизационный алгоритм контроля состояния электрической сети. Изв. РАН. Энергетика. 1994. № 2. С. 100–110.
7. Ильин В.А., Лямец Ю.Я. Задачи и методы спектрального анализа переходных процессов в электрических сетях. Изв. РАН. Энергетика. 1997. № 6. С. 46–62.
8. Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Атншикин А.Б. Распознавание аварийных состояний энергообъекта посредством локализации альтернативных режимов. Электричество. 2018. № 9. С. 29–38.
9. Лямец Ю.Я., Белянин А.А. Описание линий 6–35 кВ при распознавании замыкания на землю в распределительной сети. Электротехника. 2014. № 3. С. 2–7.
10. Пат. РФ № 2654368. Способ интервального определения места однофазного замыкания в фидере / Ю.Я. Лямец, А.А. Белянин. БИ. 2018. № 14.
11. Пат. РФ № 2542745. Способ определения места однофазного замыкания на землю / Ю.Я. Лямец, А.А. Белянин. БИ. 2015. № 6.

**Determining the Location of a Fault in a Long Line by the Values of the Wave Process**

A. A. Belyanin<sup>a, \*</sup>, Yu. Ya. Liamets<sup>a</sup>, and A. Yu. Chernov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>LLC “Relematika”, Cheboksary, Russia

<sup>b</sup>Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

\*e-mail: a.a.belyanin@gmail.com

The fault locating is review as one of the results of the algorithmic observation of a long line – the procedure for the formation of electrical quantities at any intended location of fault. The model of an intact part of the line between the place of physical observation and its arbitrary place (algorithmic model) serves as a tool for converting physically observable quantities into algorithmic ones. To date, various aspects of the algorithmic observation of a transmission line in the basis of complex values have been studied in detail. In this paper, we consider the specific features of the algorithmic observation of the fast damped transient in a long line, carrying information about the location of a single-phase earth fault in the feeder of the distribution network. Algorithmic model of a long line is described by difference equations. The instantaneous values of the output quantities of the algorithmic model form a vector whose hodograph has a regularity that helps detect the location of fault.

**Keywords:** algorithmic model, observation, power transmission, fault location