

УДК 621.315

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ ОДНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В СЕТЯХ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

*Э.Ф. Хакимзянов<sup>1</sup>, Р.Г. Мустафин<sup>1</sup>, Д.А. Глухов<sup>2</sup>, В.С. Романов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Казанский государственный энергетический университет  
Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

<sup>2</sup> Ижевская государственная сельскохозяйственная академия  
Удмуртская республика, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11

<sup>3</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Предлагается способ определения расстояний до мест двойных замыканий на землю на одной линии электропередачи путем замера аварийных составляющих фазного тока и фазного напряжения. Результаты теоретических расчетов совпали с результатами моделирования в программной среде MatLab Simulink.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, однофазное замыкание на землю, двойное замыкание на землю разных фаз одной линии, фиксирующий орган сопротивления, ближнее и дальнее место повреждения.

Длительная работа сети с ОЗЗ нежелательна, а во многих случаях и недопустима. При ОЗЗ возможно появление значительных дуговых перенапряжений, возникающих при изменении тока через канал дуги в процессе ее горения и перезаряда емкости сети. Они могут достигать четырех-пятикратных величин. Теоретические исследования и опыт эксплуатации сетей показывают, что уменьшение величины дуговых перенапряжений и ограничение тока ОЗЗ возможно включением в нейтраль трансформатора заземления нейтрали (ТЗН) высокоомного резистора или дугогасящего реактора (ДГР) [1].

Продолжительная работа сети в режиме ОЗЗ может привести к замыканию на землю во второй точке сети. Второе замыкание на землю обычно возникает на участке сети с наиболее ослабленной изоляцией и сопровождается увеличением тока и падением напряжения в поврежденных фазах, появлением в контуре повреждения токов нулевой последовательности. Однако, как показывает практика, величина тока двойного замыкания на землю недостаточна для срабатывания токовых защит от междуфазных повреждений, а защиты нулевой последовательности, как правило, действуют на сигнал.

Определение места повреждения в распределительных сетях 6-35 кВ является достаточно трудной задачей. Известен способ измерения сопротивления петли короткого замыкания для выявления места двухфазного повреждения, на основе которого рижским опытным заводом «Энергоавтоматика» выпускался фиксатор

---

*Эльмир Фердинатович Хакимзянов, старший преподаватель кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».*

*Рамиль Гамилович Мустафин (к.ф.-м.н.), доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».*

*Дмитрий Александрович Глухов, аспирант.*

*Владимир Сергеевич Романов, аспирант.*

ФМК-10. Также авторами фиксатора ФМК-10 был предложен способ определения расстояния до мест двойных замыканий на землю разных линий, отходящих от распределительного устройства подстанции [2-4]. Централизованный измеритель подключался к питающей распределительное устройство линии и определял индуктивное сопротивление контура замыкания, пропорциональное расстоянию до места повреждения.

Целью работы является разработка способа определения расстояния до мест повреждения в случае двойного замыкания на землю фаз на одной линии, отходящей от распределительного устройства подстанции.

Для достижения поставленной цели предлагается решить следующие задачи:

- определить зависимость тока двойного замыкания на землю от расстояния до мест повреждений на одной отходящей линии;
- определить зависимость изменения напряжений поврежденных фаз при возникновении двойного замыкания на землю;
- определить расстояния до мест повреждений с учетом известных зависимостей изменения тока и напряжения поврежденных фаз при возникновении двойного замыкания на землю на одной линии, отходящей от шин распределительного устройства подстанции.

Расчет значений тока и напряжения при двойных замыканиях на землю на одной линии выполняется по схемам, изображенным на рис. 1, 2, на которых представлены однолинейная схема сети (см. рис. 1) и ее схема замещения при двойном замыкании на землю (см. рис. 2), где  $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$  – ЭДС питающей системы;  $\dot{Z}_{1c}$  – эквивалентное сопротивление прямой последовательности системы;  $\dot{Z}_{1л}$  – сопротивление прямой последовательности до первого места повреждения;  $\dot{Z}'_{1л}$  – сопротивление прямой последовательности неповрежденного участка линии;  $\dot{Z}'_{0л}, \dot{Z}'_{1л}, \dot{Z}'_{2л}$  – сопротивления нулевой, прямой и обратной последовательности участка линии между повреждениями;  $\dot{Z}_{н1A}, \dot{Z}_{н1B}, \dot{Z}_{н1C}, \dot{Z}_{н2A}, \dot{Z}_{н2B}, \dot{Z}_{н2C}$  – фазные сопротивления нагрузки линий электропередачи;  $R_{п1}, R_{п2}$  – переходные сопротивления в месте замыканий;  $R_3$  – сопротивление земли;  $l_{1к}, l_{2к}$  – расстояния до мест ближнего и дальнего замыканий на землю;  $TA$  – измерительные трансформаторы тока;  $TV$  – измерительные трансформаторы напряжения;  $\Phi OC$  – фиксирующий орган сопротивления линии электропередачи.

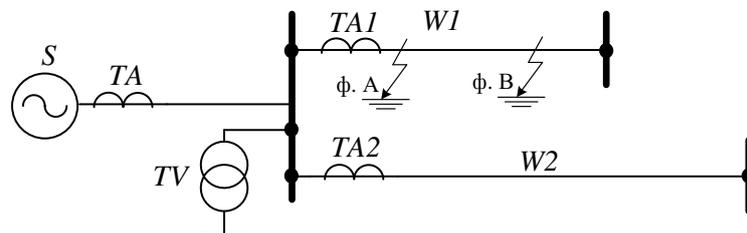


Рис. 1. Схема сети напряжением 10 кВ при двойном замыкании на землю

При расчете тока режима двойного замыкания на землю принимаются следующие допущения:

- нагрузка имеет высокое сопротивление, поэтому ее влияние на аварийный ток исключается;
- значения сопротивлений прямой и обратной последовательности линии

электропередачи принимаются одинаковыми ( $Z_{1л} = Z_{2л}$ );

– влияние емкостного сопротивления линии не учитывается.

Следует отметить, что представленная на рис. 2 схема замещения аварийного режима условна, поскольку указывает лишь сопротивления, учитываемые при расчете, и используется для того, чтобы не загромождать статью отдельными схемами замещения прямой, обратной и нулевой последовательности.

Сопротивления схемы замещения (см. рис. 2) были получены исходя из следующих соображений.

Линия имеет два разных участка.

1. Участок  $\Delta l = (l_{2к} - l_{1к})$  между замыканиями, где ток замыкания протекает по одной фазе В. При этом:

– фазный ток  $I_B$  можно представить в виде суммы токов симметричных составляющих:

$$I_B = I_0 + I_1 + I_2; \quad (1)$$

– токи симметричных составляющих равны друг другу и, соответственно, равны 1/3 фазного тока  $I_B$ :

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_B / 3; \quad (2)$$

– для расчета сопротивления контура  $Z_B = U_B / I_B$  используем формулы (1), (2):

$$Z_B = U_B / I_B = (I_0 \cdot Z_0 + I_1 \cdot Z_1 + I_2 \cdot Z_2) / I_B = (Z_0 + 2Z_1) / 3 = (Z_{0уд} + 2Z_{1уд}) \cdot \Delta l / 3. \quad (3)$$

2. Участок до первого места замыкания  $l_{1к}$ , где протекают два одинаковых по величине и противоположных по направлению тока  $I_A$  и  $I_B$ . При этом:

– ток нулевой последовательности равен нулю;

– токи прямой и обратной последовательности равны друг другу по величине и, соответственно, равны 3/2 фазного тока  $I_A$ :

$$I_1 = I_2 = (3/2) I_A. \quad (4)$$

Соответственно, на участке  $\Delta l = (l_{2к} - l_{1к})$  учитываются все три сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей, на участке  $l_{1к}$  учитываются только сопротивления прямой и обратной последовательностей.

Ток двойного замыкания на землю  $\dot{I}_{дв}$  определяется как

$$\dot{I}_{дв} = \frac{\dot{E}_A - \dot{E}_B}{2\dot{Z}'_{1с} + 2\dot{Z}'_{1л} + \dot{Z}'_{0л} + \dot{Z}'_{1л} + \dot{Z}'_{2л} + R_{п1} + R_{п2} + R_3}, \quad (5)$$

где  $\dot{Z}'_{0л} = \frac{1}{3} \dot{Z}_{0л} = \frac{1}{3} \dot{Z}_{0луд} \cdot (l_{2к} - l_{1к})$ ,  $\dot{Z}'_{1л} = \frac{1}{3} \dot{Z}_{1л} = \frac{1}{3} \dot{Z}_{1луд} \cdot (l_{2к} - l_{1к})$ ;

$$\dot{Z}'_{2л} = \frac{1}{3} \dot{Z}_{2л} = \frac{1}{3} \dot{Z}_{2луд} \cdot (l_{2к} - l_{1к}).$$

Общая формула расчета тока двойного замыкания на землю выглядит следующим образом:

$$\dot{I}_{дв} = \frac{\dot{E}_A - \dot{E}_B}{2\dot{Z}'_{1с} + 2\dot{Z}'_{1л} + \frac{1}{3} \dot{Z}'_{1луд} \cdot (l_{2к} - l_{1к}) \cdot (n+2) + R_{п1} + R_{п2} + R_3}, \quad (6)$$

где  $\dot{n} = \dot{Z}'_{0луд} / \dot{Z}'_{1луд}$  – отношение удельных сопротивлений нулевой и прямой последовательности.

Напряжения поврежденных фаз в месте установки измерительного органа сопротивления (на шинах подстанции) определяются выражениями

$$\dot{U}_A = \dot{I}_{дв} \cdot (\dot{Z}'_{1лА} + R_{п1}); \quad (7)$$

$$\dot{U}_B = \dot{I}_{дв} \cdot \left( \dot{Z}'_{1лВ} + \frac{1}{3}(\dot{Z}'_{0луд} + 2\dot{Z}'_{1луд}) \cdot (l_{2к} - l_{1к}) + R_{п2} + R_3 \right); \quad (8)$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{I}_{дв} \cdot (\dot{Z}'_{1лА} + \dot{Z}'_{1лВ} + \dot{Z}'_{0лВ} + \dot{Z}'_{1лВ} + R_{п1} + R_{п2} + R_3). \quad (9)$$

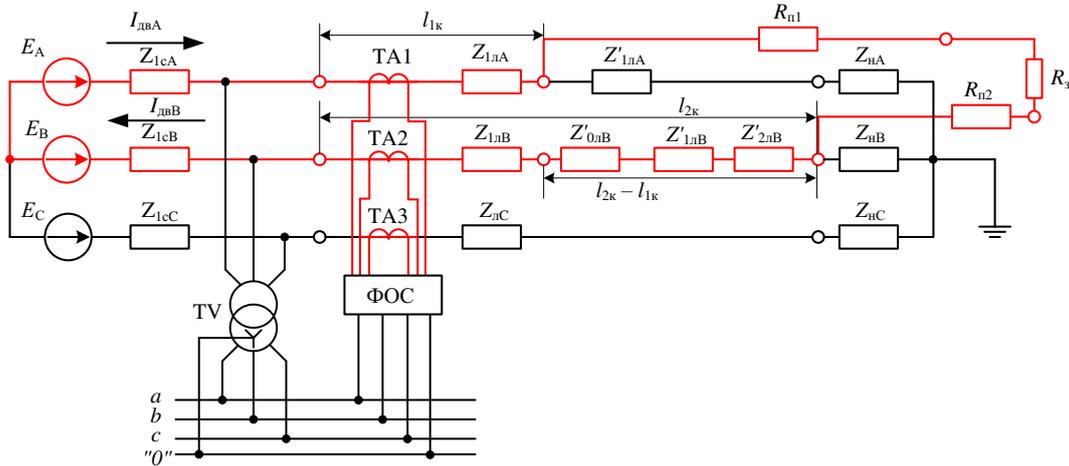


Рис. 2. Схема замещения сети в режиме двойного замыкания на землю ф. А на расстоянии  $l_{1к}$  и ф. В на расстоянии  $l_{2к}$

Определение расстояния до мест повреждений предлагается осуществлять фиксирующим органом сопротивления (ФОС), включенным на фазный ток (ток замыкания на землю) и фазное напряжение. В этом случае расчетное сопротивление  $Z_\phi$  на ФОС должно принять значение, пропорциональное расстоянию до места повреждения:

$$\dot{Z}_\phi = \frac{\dot{U}_\phi}{\dot{I}_{дв}} = \frac{\dot{I}_{дв} \cdot (\dot{Z}'_{1л} + R_{п1})}{\dot{I}_{дв}} = \dot{Z}'_{1л} + R_{п1}. \quad (10)$$

Однако полное сопротивление  $Z_\phi$  на зажимах ФОС, подключенного к фазному напряжению  $\dot{U}_\phi$  и фазному току  $\dot{I}_\phi$  поврежденной линии, зависит также и от активного переходного сопротивления в месте повреждения. Влияние активных переходных сопротивлений в контуре замыкания можно исключить путем выделения  $X_{\phi1(2)}$  по следующему выражению:

$$X_{\phi1(2)} = \left| \frac{\text{Im}(U_{\phi1(2)}) \cdot \text{Re}(I_{\phi1(2)}) - \text{Im}(I_{\phi1(2)}) \cdot \text{Re}(U_{\phi1(2)})}{\text{Re}^2(I_{\phi1(2)}) + \text{Im}^2(I_{\phi1(2)})} \right|, \quad (11)$$

где  $\text{Re}(U_{\phi1(2)})$ ,  $\text{Im}(U_{\phi1(2)})$ ,  $\text{Re}(I_{\phi1(2)})$ ,  $\text{Im}(I_{\phi1(2)})$  – реальные и мнимые составляющие фазного тока и напряжения поврежденных фаз.

Расстояние до ближнего места повреждения  $l_{1к}$  производится определением меньшего абсолютного значения индуктивного сопротивления поврежденных фаз  $X_\phi$ , например: если расчетное сопротивление  $X_{\phi1} < X_{\phi2}$ , то повреждение  $l_{1к}$  ближе, и  $l_{1к} < l_{2к}$ .

Тогда с учетом изложенного расстояние до ближнего места повреждения  $l_{1к}$  можно найти в виде

$$l_{1к} = X_{\phi 1} / X_{1\text{луд}}, \quad (12)$$

где  $X_{1\text{луд}}$  – удельное индуктивное сопротивление прямой последовательности линии электропередачи.

Расстояние между точками замыканий  $\Delta l = (l_{2к} - l_{1к})$  можно определить, используя разность сопротивлений  $X_1$  и  $X_2$ :

$$\Delta l = 3(X_{\phi 2} - X_{\phi 1}) / (X_{0\text{луд}} + 2X_{1\text{луд}}), \quad (13)$$

где  $X_{0\text{луд}}$  – удельные индуктивные сопротивления нулевой последовательности линии электропередачи.

Расстояние  $l_{2к} = l_{1к} + \Delta l$  и есть дистанция до дальней точки замыкания:

$$l_{2к} = l_{1к} + 3(X_{\phi 2} - X_{\phi 1}) / (X_{0\text{луд}} + 2X_{1\text{луд}}). \quad (14)$$

Практическая реализация предлагаемого измерительного органа сопротивления возможна на основе современных микропроцессорных комплексов дистанционной защиты. Измерительный орган сопротивления, включенный на фазный ток и фазное напряжение, соответствует требованию пропорциональности сопротивления на зажимах реле расстоянию до места повреждения в режиме двойного замыкания на землю в распределительной сети с малыми токами замыкания на землю.

Проверка алгоритма проводилась с помощью моделирования рассматриваемого аварийного режима в программном пакете MatLab Simulink, в котором анализировалась схема, представленная на рис. 1. Параметры схемы следующие: система  $S$  имеет отношение  $X/R = 0.6/0.1$ , длина линии  $W1 = 10$  км,  $W2 = 12$  км. Удельные активные и индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательности линии:  $X_{1\text{луд}} = 0.37$  Ом/км,  $X_{0\text{луд}} = 1.57$  Ом/км,  $R_{1\text{луд}} = 0.57$  Ом/км,  $R_{0\text{луд}} = 0.72$  Ом/км, влияние земли учитывается сопротивлением  $R_3 = 10$  Ом, переходное сопротивление в месте повреждения принято равным  $0$  Ом. В момент времени  $t_1 = 0,1$  с происходит замыкание на землю ф.  $A$ , ф.  $B$  линии  $W1$  на расстоянии  $1$  км и  $10$  км соответственно. В модели фиксируются значения фазных токов на поврежденной линии  $T_{A1}$ , фазные и линейные напряжения на шинах распределительного устройства от трансформатора напряжения  $TV$ .

Параметры линии определены с помощью встроенного в MatLab модуля, который по габаритам опоры определяет сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности линии.

Так, амплитуда тока двойного замыкания на землю при заданных расстояниях до мест повреждений согласно формуле (6) составляет  $738$  А.

Амплитуды напряжений поврежденных фаз  $U_A$ ,  $U_B$  согласно формулам (7), (8) равны  $507$  В и  $13$  кВ соответственно.

Тогда индуктивные сопротивления, определенные по формуле (11),  $X_{\phi A} = 0,37$  Ом,  $X_{\phi B} = 7,3$  Ом.

Для расчета расстояния до ближнего места повреждения  $l_{1к}$  принимается минимальное значение сопротивления  $X_{\phi A}$ . Тогда, используя формулу (12), получаем расстояние  $l_{1к} = 1$  км.

Расстояние до дальнего места повреждения  $l_{2к}$  с учетом вычисленных значений сопротивления  $X_{\phi}$  равно  $10$  км.

На точность определения расстояния до места повреждения могут оказать влияние инструментальные погрешности измерительных органов сопротивления, обусловленные погрешностями измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Предлагаемый способ может работать в сетях как с изолированной, так и с

компенсированной нейтралью, поскольку сопротивление контура повреждения не зависит от режима заземления нейтрали [5-6].

Таким образом, предлагаемый способ позволяет с высокой точностью определить расстояние до мест двойных замыканий на землю на одной линии электропередачи при помощи установки ФОС, включенного на фазное напряжение и фазный ток поврежденных линий, а следовательно, сократит затраты на поиск места повреждения и ускорит процесс восстановления электроснабжения потребителей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Манилов А.М., Барна А. ОЗЗ в сетях 6-35 кВ с комбинированным заземлением нейтрали / Новости ЭлектроТехники.– 2012. – № 6(78) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/78/06.php>.
2. Авторское свидетельство СССР № 1569752. Способ определения расстояния до места двухфазного короткого замыкания / Э.П. Ванзович, А.-С.С. Саухатас, В.Г. Гловацкий, А.П. Кузнецов / Заяв. 26.04.1988, опубл. 07.06.1990. Бюл. № 21. – 4 с.
3. Авторское свидетельство СССР № 1569753. Способ определения расстояния до мест двойных замыканий на землю / Э.П. Ванзович, А.-С.С. Саухатас, В.Г. Гловацкий / Заяв. 16.05.1988, опубл. 07.06.1990. Бюл. № 21. – 5 с.
4. Гловацкий В.Г., Халидов А.Г. Определение расстояния до мест двойных замыканий на землю в электрических сетях 35 кВ // Энергетик. – 1985. – № 9. – С. 31.
5. Хакимзянов Э.Ф., Исаков Р.Г. Поведение измерительных органов сопротивления при двойных замыканиях на землю в распределительных сетях 6-35 кВ // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 1 (14). – С. 18–21.
6. Хакимзянов Э.Ф., Исаков Р.Г., Мустафин Р.Г. Измерительный орган сопротивления, выявляющий двойное замыкание на землю в распределительных сетях 6-35 кВ // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 3 (16). – С. 29–35.

*Статья поступила в редакцию 17 марта 2015 г.*

### **DETERMINATION OF DISTANCE TO PLACES OF DAMAGES AT DOUBLE SHORT CIRCUITS TO EARTH OF ONE POWER LINE IN NETWORKS WITH SMALL CURRENTS OF SHORT CIRCUIT TO EARTH**

***E.F. Hakimzyanov<sup>1</sup>, R.G. Mustafin<sup>1</sup>, D.A. Gluhov<sup>2</sup>, V.S. Romanov<sup>3</sup>***

<sup>1</sup> Kazansky State Power Engineering University  
51, Krasnoselskaya st., Kazan, 420066

<sup>2</sup> Izhevsk State Agricultural Academy  
11, Studencheskaya st., Izhevsk, 426069

<sup>3</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*In article the way of determination of distances to places of double short circuits on the earth on one power line by measurement of emergency components of phase current and phase tension is offered. Results of theoretical calculations coincided with results of modeling in the program MatLab Simulink environment.*

**Keywords:** *a power line, single-phase short circuit on the earth, double short circuit on the earth of different phases of one line, the fixing body of resistance, a near and far place of damage.*

---

*El'mir F. Hakimzyanov, Senior Lecture.*

*Ramil G. Mustafin (Ph.D. (Phys. & Math.)), Associate Professor.*

*Dmitry A. Gluhov, Postgraduate Student.*

*Vladimir S. Romanov, Postgraduate Student.*