

**УДК 621.3.064.1****А.С. Серебряков, В.Л. Осокин****ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАЛЕННОСТИ МЕСТА КОРОТКОГО  
ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ  
С ДВУХСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ**

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Статья посвящена вопросам определения удаленности места короткого замыкания в электротехническом комплексе с двухсторонним питанием. Высокая точность определения места повреждения позволяет сократить перерывы в электроснабжении потребителей и уменьшить ущерб от короткого замыкания. Авторами предложен метод определения удаленности места короткого замыкания в межподстанционной зоне тяговой сети однопутного участка железной дороги, электрифицированной на переменном токе. Алгоритм расчета исключает погрешность от влияния возникшей в месте короткого замыкания электрической дуги или переходного сопротивления. Метод рассмотрен на примере двух смежных подстанций электрифицированного участка, получающих питание от одной системы внешнего электроснабжения. Подстанции имеют такое взаимное сопротивление, что потребляемый при коротком замыкании ток одной подстанции влияет на значение тока другой подстанции. Показано, что при определении удаленности короткого замыкания с помощью предложенного метода взаимное сопротивление и наличие переходного сопротивления и электрической дуги в месте короткого замыкания не оказывают влияния на точность определения удаленности короткого замыкания.

**Ключевые слова:** аварийный режим, двухстороннее питание, сопротивление петли, тяговая сеть электрифицированной железной дороги, удаленность короткого замыкания.

**1. Введение**

При коротких замыканиях в электрической сети весьма важным является вопрос, как в наиболее короткий срок точно определить место повреждения. Существующие методы определения удаленности места повреждения от питающей подстанции основаны на анализе параметров аварийного режима, которые несут в себе информацию об удаленности места короткого замыкания [1, 2].

Удаленность места короткого замыкания (КЗ) в электрической сети можно определить по указанным выше методам следующим образом. В момент КЗ в сети приборы, установленные на подстанциях, измеряют параметры аварийного режима (в том числе ток фидера и напряжение на ши-

нах подстанции), на основании которых делается заключение об удаленности места КЗ от подстанции. Определение удаленности места КЗ в общем виде, например, при двух односторонних петлевых схемах питания двухпутных участков или при двухстороннем питании однопутного участка, основано на вычислении модуля входного сопротивления  $Z_K$  петли КЗ относительно шин ближайшей к месту КЗ подстанции по формуле:

$$Z_K = \frac{U_{ш}}{I_{кф}}, \quad (1)$$

где  $U_{ш}$  – напряжение на шинах подстанции в момент КЗ;  $I_{кф}$  – ток фидера сети, где произошло КЗ.

Расстояние  $L_K$  от подстанции до места КЗ определяется по формуле:

$$L_K = \frac{Z_K}{z_C}, \quad (2)$$

где  $z_C$  – модуль удельного (погонного) сопротивления сети.

Недостатком этого метода, называемого методом  $Z$ , и недостатком устройства на его основе является низкая точность определения удаленности места КЗ. При глухом (металлическом) КЗ погрешность составляет 400 – 500 м, а при КЗ через переходное сопротивление погрешность может увеличиться до 2-4 км.

При определении удаленности места короткого замыкания в электрической сети с двухсторонним питанием по раздельной, узловой или параллельной схемам, более точным является метод двухстороннего измерения токов. При этом методе в момент короткого замыкания измеряют ток  $I_{КА}$  одной подстанции  $A$  и ток  $I_{КВ}$  второй (смежной) подстанции  $B$ . Затем вычисляют отношение  $I_{КА}/(I_{КА}+I_{КВ})$  или  $I_{КВ}/(I_{КА}+I_{КВ})$ , по значению которого судят об удаленности места короткого замыкания.

Однако при КЗ через переходное сопротивление  $R_{П}$  или сопротивление дуги  $R_{Д}$  при двухстороннем питании электрической сети, падение напряжения на переходном сопротивлении или на сопротивлении дуги определяется не только током поврежденного фидера, но и током смежной подстанции. Измерители параметров КЗ на поврежденном фидере воспринимают это явление как возрастание сопротивления петли короткого замыкания  $Z_K$ , что и увеличивает погрешность определения расстояния от подстанции до места повреждения.

## II. Цели и задачи исследования

Целью предлагаемой статьи и техническим результатом при реализации ее основных положений является повышение точности определения расстояния до места повреждения при двухстороннем измерении токов смежных подстанций. Повышение точности определения удаленности места КЗ достигается за счет учета связи подстанций по линиям электропередачи системы внешнего электроснабжения и предложенного алгоритма расчета удаленности места повреждения, исключающего погрешность от влияния возникшей в месте КЗ электрической дуги или переходного сопротивления.

## III. Материалы и методы

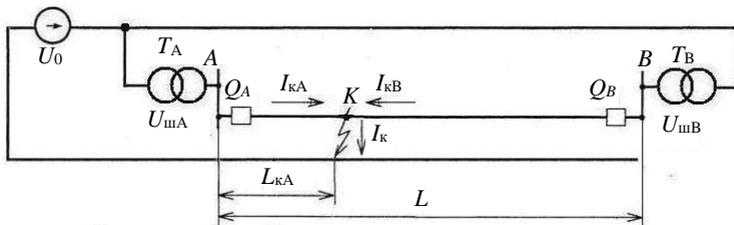
Рассмотрим основные положения метода на примере тяговой сети однопутного участка электрифицированной железной дороги переменного тока с двухсторонним питанием межподстанционной зоны. В руководящих указаниях по релейной защите систем тягового электроснабжения [3, 4] смежные подстанции *A* и *B*, питающие межподстанционную зону, представляются как независимые и не связанные между собой источника напряжения. В статье 2013 г. показано, что в действительности питание обеих подстанций *A* и *B* осуществляется от одной и той же энергетической системы (системы внешнего электроснабжения) [5]. Поэтому в схеме двухстороннего питания межподстанционной зоны будем указывать только один общий источник питания. Как показано в работах Л.А.Германа, при этом снижается погрешность расчета токов короткого замыкания в тяговой сети [5, 6]. Одновременно с этим уменьшается и погрешность при определении удаленности места КЗ.

Принципиальная схема и схема замещения тяговой электрической сети однопутного участка с двухсторонним питанием от одной системы внешнего электроснабжения приведены на рис. 1.

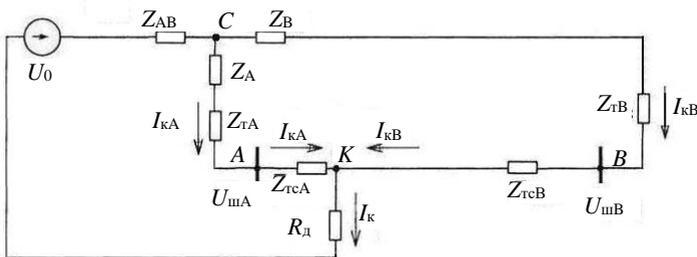
Сопротивления  $Z_{TA}$  и  $Z_{TB}$  берутся из паспортов тяговых трансформаторов. Сопротивления  $Z_{AB}$ ,  $Z_A$  и  $Z_B$  задаются энергоснабжающей организацией или определяются из трех опытов коротких замыканий на шинах подстанций *A* и *B*. При экспериментальном определении параметров введем дополнительно следующие обозначения:  $Z_{ПА} = Z_A + Z_{TA}$  и  $Z_{ПВ} = Z_B + Z_{TB}$  – сопротивления подстанций *A* и *B*. Тогда для определения указанных выше параметров составим три следующих уравнения:

$$\begin{aligned} Z_{AB} + Z_{ПА} &= \frac{U_0}{I_{кА(A)}}; \\ Z_{AB} + Z_{ПВ} &= \frac{U_0}{I_{кВ(B)}}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$Z_{\text{ПА}} \cdot I_{\text{КА(AB)}} = Z_{\text{ПБ}} \cdot I_{\text{КБ(AB)}} \cdot$$



а.



б.

Рис. 1. Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) электрической сети с двухсторонним питанием от одной системы внешнего электроснабжения:

$T_A$  и  $T_B$  – тяговые трехфазные трансформаторы подстанций  $A$  и  $B$ ;  
 $Q_A$  и  $Q_B$  – выключатели фидеров на подстанциях  $A$  и  $B$ ;  $U_{\text{шA}}$  и  $U_{\text{шB}}$  – напряжения на шинах подстанций  $A$  и  $B$ ;  $Z_{\text{AB}}$  – сопротивление питающей линии, общей для подстанций  $A$  и  $B$ , называемое далее взаимным сопротивлением;  
 $Z_A$  – сопротивление питающей линии подстанции  $A$ ;  $Z_B$  – сопротивление питающей линии подстанции  $B$ ;  $Z_{\text{ТА}}$  и  $Z_{\text{ТВ}}$  – сопротивления короткого замыкания тяговых трансформаторов  $T_A$  и  $T_B$  подстанций  $A$  и  $B$ ;  $Z_{\text{ТСА}}$  и  $Z_{\text{ТСВ}}$  – сопротивления участков тяговой сети от места КЗ до подстанций  $A$  и  $B$ ;  $I_K$  – ток короткого замыкания;  
 $U_0$  – напряжение питающей системы внешнего электроснабжения.

Здесь  $I_{\text{КА(А)}}$  и  $I_{\text{КБ(В)}}$  – токи питающих линий подстанций  $A$  и  $B$  при коротком замыкании на шинах только одной подстанции, указанной в скобках; вторая подстанция при этом отключена;  $I_{\text{КА(AB)}}$  и  $I_{\text{КБ(AB)}}$  – токи питающих линий подстанций  $A$  и  $B$  при коротком замыкании одновременно на шинах двух подстанций  $A$  и  $B$ , указанных в скобках.

Решая совместно уравнения (3)-(5), получим:

$$Z_{ПВ} = U_0 \cdot \frac{(I_{кВ(В)} - I_{кА(А)}) \cdot I_{кА(АВ)}}{(I_{кВ(АВ)} - I_{кА(АВ)}) \cdot I_{кА(А)} \cdot I_{кВ(В)}}. \quad (6)$$

$$Z_{ПА} = Z_{ПВ} \cdot \frac{I_{кВ(АВ)}}{I_{кА(АВ)}} = U_0 \cdot \frac{(I_{кВ(В)} - I_{кА(А)}) \cdot I_{кВ(АВ)}}{(I_{кВ(АВ)} - I_{кА(АВ)}) \cdot I_{кА(А)} \cdot I_{кВ(В)}}. \quad (7)$$

$$Z_{АВ} = \frac{U_0}{I_{кВ(В)}} - Z_{ПВ} = U_0 \cdot \left[ \frac{I_{кВ(АВ)} \cdot I_{кА(А)} - I_{кВ(В)} \cdot I_{кА(АВ)}}{(I_{кВ(АВ)} - I_{кА(АВ)}) \cdot I_{кА(А)} \cdot I_{кВ(В)}} \right]. \quad (8)$$

Значения указанных выше сопротивлений используются далее для определения удаленности места короткого замыкания от подстанций.

Опишем способ определения места КЗ. Как видно из рис. 1, ток  $I_K$  является суммой двух токов, которые посылают к месту короткого замыкания подстанции  $A$  и  $B$ :

$$\underline{I}_K = \underline{I}_{КА} + \underline{I}_{КВ}. \quad (9)$$

Токи  $\underline{I}_{КА}$  и  $\underline{I}_{КВ}$  проходят по двум параллельным ветвям. Известно, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально сопротивлению параллельно соединенных ветвей. На схеме (рис. 1) показано, что обе подстанции питаются от одной энергетической системы. Токи в параллельных ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей, т.е.:

$$\frac{\underline{I}_{КА}}{\underline{I}_{КВ}} = \frac{\underline{Z}_{ПВ} + \underline{Z}_{ТС.В}}{\underline{Z}_{ПА} + \underline{Z}_{ТС.А}} = \frac{\underline{Z}_{В} + \underline{Z}_{ТВ} + \underline{Z}_{ТС.В}}{\underline{Z}_{А} + \underline{Z}_{ТА} + \underline{Z}_{ТС.А}} = \underline{K} = K \cdot e^{j\varphi_K}. \quad (10)$$

где  $\varphi_K$  – фазовый параметр комплексного коэффициента  $K$ : для подстанции  $A$ :  $\underline{Z}_A$ ,  $\underline{Z}_{ТА}$  и  $\underline{Z}_{ПА}$  – сопротивление питающей линии, сопротивление короткого замыкания тягового трансформатора и сопротивление подстанции  $A$ ; для подстанции  $B$ :  $\underline{Z}_B$ ,  $\underline{Z}_{ТВ}$  и  $\underline{Z}_{ПВ}$  – сопротивление питающей линии, сопротивление короткого замыкания тягового трансформатора и сопротивление подстанции  $B$ ;  $\underline{Z}_{ТСА}$  и  $\underline{Z}_{ТСВ}$  – сопротивления тяговой сети от места КЗ до подстанции  $A$  и подстанции  $B$ .

Обозначим полное сопротивление тяговой сети  $\underline{Z}_{ТС}$  с учетом того, что:

$$\underline{Z}_{ТСА} + \underline{Z}_{ТСВ} = \underline{Z}_{ТС}. \quad (11)$$

Из формул (10) и (11) можно определить сопротивления  $\underline{Z}_{TC.A}$  тяговой сети от тяговой подстанции  $A$  до места КЗ и  $\underline{Z}_{TC.B}$  от тяговой подстанции  $B$  до места КЗ:

$$\underline{Z}_{TC.A} = \frac{\underline{Z}_{П.B} - K \cdot \underline{Z}_{П.A} + \underline{Z}_{TC}}{K + 1}; \quad (12)$$

$$\underline{Z}_{TC.B} = \frac{K \cdot \underline{Z}_{П.A} - \underline{Z}_{П.B} + \underline{Z}_{TC}}{K + 1}. \quad (13)$$

Расстояние  $L_{КА}$  от тяговой подстанции  $A$  до места КЗ определяется по формуле:

$$L_{КА} = \frac{Z_{TCA}}{Z_{TC}} \cdot L. \quad (14)$$

Аналогично расстояние от места КЗ до подстанции  $B$  определяется:

$$L_{KB} = \frac{Z_{TCB}}{Z_{TC}} \cdot L. \quad (15)$$

Достоинством формул (14) и (15) является то, что в них не входит величина переходного сопротивления  $R_d$  в месте КЗ и сопротивление общей линии электропередачи  $Z_{AB}$ . Поэтому их значения знать не обязательно, оно не отражается на точности определения расстояния до места КЗ.

#### **IV. Программа для определения удаленности места короткого замыкания**

По приведенным выше уравнениям составлена программа для определения удаленности места короткого замыкания. Предварительно в программу вводятся значения сопротивлений питающих линий, сопротивления короткого замыкания трансформаторов и сопротивление тяговой сети межподстанционной зоны от подстанции  $A$  до подстанции  $B$ . По их значениям рассчитываются внутренние сопротивления  $\underline{Z}_{П.A}$  и  $\underline{Z}_{П.B}$  подстанций  $A$  и  $B$ . После отключения выключателями  $Q_A$  и  $Q_B$  короткого замыкания в центр управления с интеллектуальных терминалов ИнТер, установленных на подстанциях  $A$  и  $B$ , в программу вводятся зафиксированные параметры аварийного режима: напряжения на шинах подстанций, токи фидеров и углы сдвига по фазе между соответствующими напряжениями и токами  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$ .

Далее, по формуле (10) рассчитывается комплексный коэффициент  $\underline{K}$ . Отметим, что для нахождения фазового аргумента  $\varphi_K$  коэффициента  $\underline{K}$

векторы токов  $\underline{I}_{КА}$  и  $\underline{I}_{КВ}$  должны быть взаимно ориентированы относительно базовой оси, в качестве которой можно принять вектор напряжения  $\underline{U}_C$  в точке  $C$  (рис. 1, б), который является общим для указанных токов в ветвях. Для нахождения напряжения  $\underline{U}_C$  в точке  $C$ , фазы токов  $\underline{I}_{КА}$  и  $\underline{I}_{КВ}$  поочередно принимаются за нуль (рис. 2).

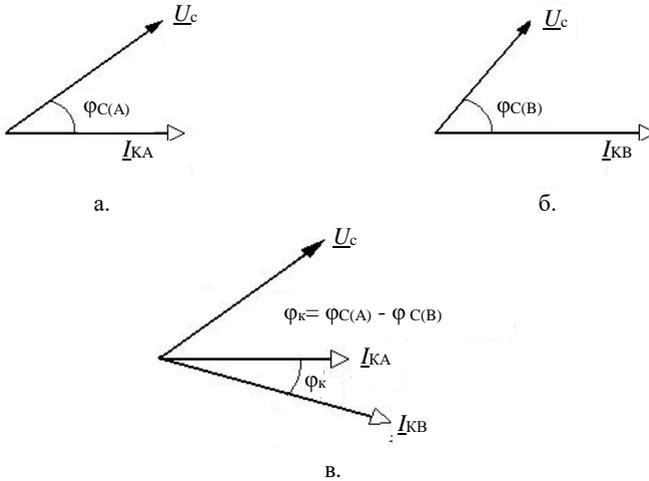


Рис. 2. Нахождение фазового аргумента  $\varphi_k$  коэффициента  $\underline{K}$

Разность вычисленных аргументов  $\varphi_{C(A)}$  и  $\varphi_{C(B)}$  напряжений в точке  $C$  для двух указанных выше случаев и будет аргументом  $\varphi_k$  коэффициента  $\underline{K}$ . Далее по формуле (14) рассчитывается расстояние от места КЗ до подстанции  $A$  и по формуле (15) – до подстанции  $B$ . Погрешность определения удаленности места КЗ составляет менее 0,1%.

Заметим, что если интеллектуальные терминалы ИнТер, установленные на подстанциях  $A$  и  $B$ , сами определяют базовый вектор и ориентируют относительно него все требуемые параметры аварийного режима, то значение сопротивления контактной сети от места КЗ до подстанции  $A$  определяется по формуле:

$$\underline{Z}_{ТC.A} = \frac{\underline{U}_{Ш.A} - \underline{U}_{Ш.ИA} + \underline{Z}_{ТC} \cdot \underline{I}_{КВ}}{\underline{I}_{КА} + \underline{I}_{КВ}}. \quad (16)$$

Далее по формуле (14) рассчитывается расстояние от места КЗ до подстанции  $A$ .

### В. Заключение

С помощью предлагаемого метода за счет повышения точности определения места повреждения можно ускорить нахождение этого места повреждения в сети, сократить перерывы в электроснабжении потребителей, тем самым повысив надежность системы электроснабжения.

© Серебряков А.С., 2018

© Осокин В.Л., 2018

### Библиографический список

- [1] Фигурнов Е.П. Релейная защита: Учебник. В 2 ч. Ч 2. М.: УМЦ ЖДТ, 2009. – 604 с.
- [2] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока. М.: Маршрут, 2006. – 272 с.
- [3] Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2005. – 216 с.
- [4] СТО РЖД 07.021.4-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока. Шифр 11.176 ЦЭ ОАО «РЖД» 2015 г.
- [5] Герман Л.А., Кишкурно К.В. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 1. С. 16-21.
- [6] Герман Л.А. Способ определения узлового взаимного сопротивления в тяговой сети железных дорог. Пат. 23967077 РФ, опубли. 20.08.2001.

**A.S. Serebryakov, V.L. Osokin**

## **DETERMINATION OF DISTANCE TO SHORT CURCUIT POINT IN ELECTRIC NETWORK WITH TWO-WAY POWER SUPPLY**

Nizhny Novgorod Engineering-economic State University  
Knyaginino, Russia

**Abstract.** The article is devoted to the issues of determining the distance of the short circuit in the electrical complex with two-way power supply. The high accuracy of determining the location of the damage reduces the interruptions in the power supply and reduces the damage caused by a short circuit. The authors proposed a method for determining the distance to the short circuit point in the inter-station zone of the traction alternating current network of a single-track section of the railway. The calculation algorithm eliminates the error from the influence of the electric arc or transient resistance arising at

the short circuit point. The method is considered on the example of two adjacent substations of the electrified section, receiving power from one external power supply system. Substations have such mutual resistance that the current consumed in a short circuit of one substation affects the current value of another substation. It is shown that the mutual resistance and the presence of a transient resistance and an electric arc in the short circuit point do not affect the accuracy of determining the short circuit distance when determining the distance of a short circuit using the proposed method.

**Keywords:** emergency mode, loop resistance, short circuit distance, traction network of electrified railway, two-way power.

### References

- [1] E.P. Figurnov, Relay Protection: Tutorial. T. 2. Moscow: UMT ZHTT, 2009.
- [2] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and T.E. Petrova, Relay protection of traction AC power supply networks. Moscow: Route, 2006.
- [3] Guidelines for relay protection of traction power supply systems. Moscow: TRANSIZDAT, 2005.
- [4] STO RZD 07.021.4-2015. Protection of power supply systems of the railway against short circuits and overload. Part 4. The method of selection of protection settings in the system of traction power supply of alternating current. Cipher 11.176 TSE JSC «RZD» 2015.
- [5] L.A. German and K.V. Kishkurno. Comparison between calculation methods of electric traction power supply system at various parameter account techniques of external power supply network // Vestnik of the Railway Research Institute, vol. 1, pp. 16-21, 2013.
- [6] L.A. German. The method of determining the nodal mutual resistance in the traction network of railways // R.F. Patent 23967077, August 20, 2001.