

УДК 621.332

И.П. Карпов, С.В. Демидов

## СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПОСЛЕАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Горьковская дирекция по энергообеспечению

Представлен вариант устройства определения коротких замыканий (КЗ), ранее не применявшийся в эксплуатации на полигоне железных дорог в России. Приводится обзор способов диагностики контактной сети на наличие устойчивых КЗ, разработанных с целью защиты электроустановок от неуспешных повторных включений. Для исследования применяемых в эксплуатации методов определения повреждений использовались данные электронных осциллографов, установленных на тяговых подстанциях Горьковской ЖД. Актуальность и практическая значимость работы определена тем, что автоматическое повторное включение (АПВ) является важной частью бесперебойного функционирования системы тягового электроснабжения. Анализ работы защит выключателей фидеров переменного тока показывает, что большинство КЗ являются проходящими, т.е., самоустраиваются за счет термического разрушения предметов, вызвавших перекрытие изоляции, током короткого замыкания, или за счет деионизации перекрытого изолирующего воздушного промежутка в бестоковую паузу (время АПВ в среднем 4-6 с). При подобных КЗ основная изоляция тяговой сети не повреждается, за счет чего и происходит успешное повторное включение. Но есть и другие виды короткого замыкания: глухие, металлические КЗ, при которых происходит непосредственный контакт элементов тяговой сети, находящихся под разными потенциалами (например, в результате падения контактного провода на рельс); неустойчивые КЗ, вызванные повреждением основной изоляции (например, разбитая гирлянда изоляторов). Повторное включение на такие виды КЗ может привести к развитию аварии, разрушению дорогостоящего оборудования.

**Ключевые слова:** автоматическое повторное включение, выявление повреждений после аварийного отключения, наведенное напряжение, неустойчивое повреждение, металлическое короткое замыкание, опробование изоляции.

### 1. Введение

В настоящее время, в системе тягового электроснабжения переменного тока системы 25кВ (2\*25 кВ) остается актуальной проблема определения наличия (или отсутствия) повреждения в контактной сети после аварийного отключения выключателя фидера. Этот вопрос является одним из ключевых в процессе автоматизации электроснабжения тяговых потреби-

телей. Наряду с этим вопросом, были неоднократно рассмотрены и особенности автоматического функционирования [1-5].

Рассмотрим два известных способа диагностирования контактной сети (с их преимуществами и недостатками), в результате которых можно определить факт повреждения (или его отсутствия) тяговой сети переменного тока: во-первых, контроль остаточного и наведенного напряжения; во-вторых, опробование состояния сети с токоограничивающим резистором.

### II. Устойчивые короткие замыкания

На полигоне Горьковской железной дороги успешно внедрены методы определения устойчивых, металлических коротких замыканий, которые основаны на анализе остаточного и наведенного напряжения в отключенной контактной сети [6-9].

Для этих целей используется специально установленный трансформатор напряжения ( $TV$ ), подключенный со стороны контактной сети и измеряющий напряжение в линии представленный на рис. 1.

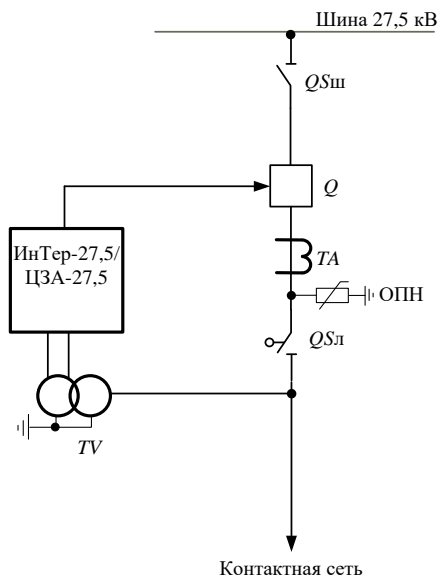


Рис. 1. Схема контроля напряжения терминалами ИнТер-27,5 и ЦЗА-27,5

Определение устойчивых повреждений реализовано на базе микропроцессорных терминалов защит типа ИнТер-27,5 и ЦЗА-27,5 (рис. 1). После аварийного отключения терминал анализирует напряжение в отклю-

ченной контактной сети. Если измеренное напряжение выше уставки делается вывод об отсутствии устойчивого повреждения и дается разрешение на автоматическое повторное включение выключателя фидера.

Осциллограмма при устойчивом КЗ (завешана штанга в середине межподстанционной зоны, имитация металлического КЗ) представлена на рис. 2.

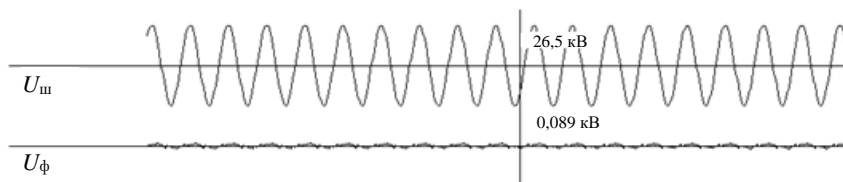


Рис. 2. Осциллограмма при устойчивом, металлическом КЗ:

$U_{ш}$  – напряжение на шине 27,5 кВ тяговой подстанции;

$U_{ф}$  – напряжение фидера в линии (трансформатор  $TV$  на рис. 1)

Измеренное наведенное напряжение составило 0,089 кВ при нормальном уровне 3-6 кВ.

Определение отсутствия повреждений и разрешение на АПВ определяется косвенно, на основании анализа уровня напряжения в отключенной контактной сети.

### III. Неустойчивые короткие замыкания

Косвенный метод хорошо зарекомендовал себя при устойчивых повреждениях, в то же время существует вид коротких замыканий, которые не выявляются косвенным путем. Так называемые неустойчивые короткие замыкания, при которых нет металлической связи токоведущих частей с землей, изоляция нарушена, но не до конца. При данных видах повреждений анализ наведенного напряжения будет говорить о проходящем характере замыкания и о возможности АПВ. Уровень измеренного напряжения будет в пределах 3-6 кВ. Но при подаче рабочего напряжения (27,5 кВ) произойдет повторное аварийное отключение. Это происходит из-за того, что поврежденная изоляция контактной сети или электроподвижного состава (ЭПС) держит остаточное и наведенное напряжение (3-6 кВ), но повторно пробивается при подаче рабочего напряжения (27,5 кВ).

Пример неустойчивого КЗ – разрушенная гирлянда изоляторов. Осциллограмма неуспешного включения при этом повреждении представлена на рис. 3.

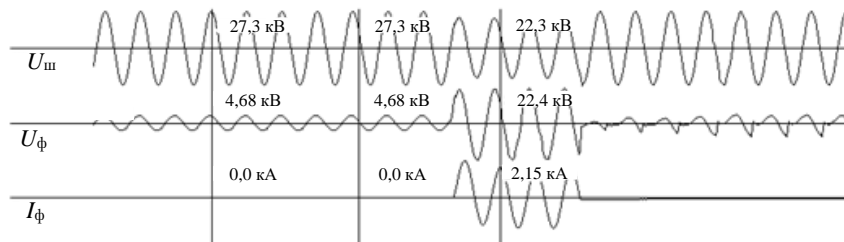


Рис. 3. Напряжения в отключенной к/с при неустойчивом КЗ (разрушение гирлянды изоляторов):

$U_{ш}$  – напряжение на шине 27,5 кВ тяговой подстанции;

$U_{ф}$  – напряжение фидера, в линии;  $I_{ф}$  – ток фидера

Уровень напряжения в отключенной контактной сети (4,68 кВ) говорит об отсутствии повреждения, но включение неуспешное (ток замыкания 2,15 кА). Позже, на участке контактной сети была обнаружена разрушенная гирлянда изоляторов типа ПС-70.

Еще один пример подобного повреждения: перекрытие ОПН установленного между  $Q$  и  $QS_{л}$  (рис. 1). Осциллограмма неуспешного включения представлена на рис. 4.

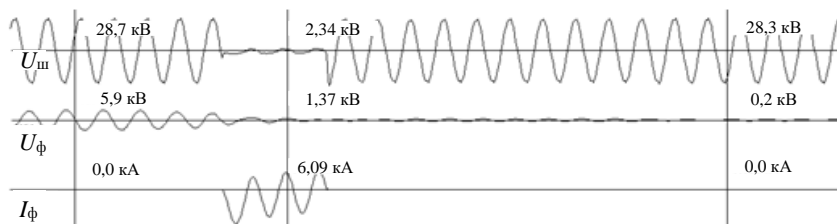


Рис. 4. Напряжения в отключенной к/с при неустойчивом КЗ (пробой изоляции корпуса ОПН):

$U_{ш}$  – напряжение на шине 27,5 кВ тяговой подстанции;

$U_{ф}$  – напряжение фидера, в линии;  $I_{ф}$  – ток фидера

Измеренное напряжение (5,9 кВ), как и в случае с поврежденной гирляндой изоляторов, говорит об отсутствии устойчивого КЗ, но при подаче повторного происходит повторный пробой изоляции корпуса ОПН. Воздействие тока КЗ при этом повторном включении окончательно разрушает изоляцию и переводит данное повреждение в разряд устойчивых, наведенное напряжение снижается с 5,9 кВ до 0,2 кВ.

Таким образом, для гарантированного успешного повторного включения необходимы дополнительные методы определения отсутствия по-

вреждения. Необходимо дополнить косвенные методы анализа наведенного напряжения активным воздействием на контактную сеть путем опробования изоляции в бестоковую паузу.

#### IV. Опробование изоляции рабочим напряжением

Вариант опробования через испытательный токоограничивающий резистор был предложен в учебнике «Релейная защита» (2009 г.) Е.П. Фигурнова [10]. Испытательный резистор ( $R_n$ ) сопротивлением 2000 Ом постоянно подключен к шине 27,5 кВ параллельно выключателю  $Q$  фидера. При аварийном отключении выключателя  $Q$  напряжение 27,5 кВ подается в контактную сеть непосредственно через  $R_n$ . Реле тока  $KA$  и напряжения  $KV$  контролируют напряжение и ток в контактной сети. Схема опробования представлена на рис. 5.

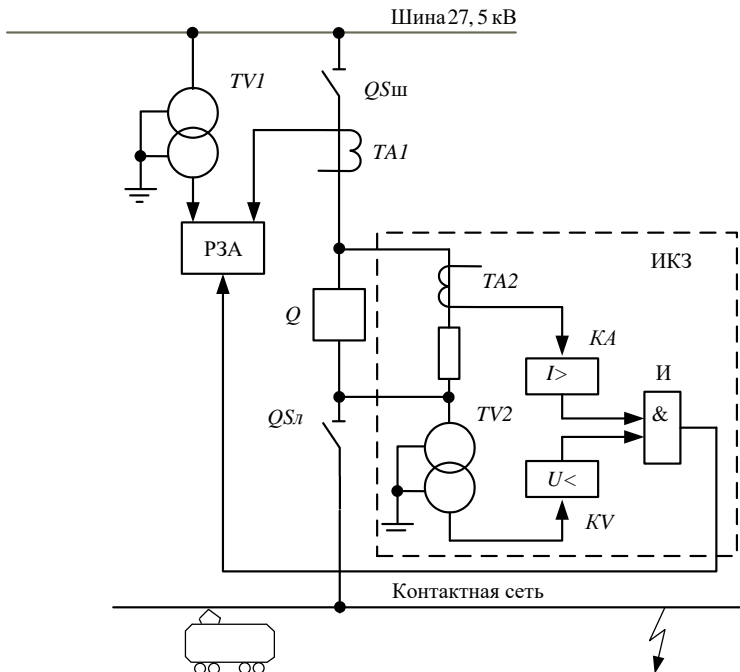


Рис. 5. Схема опробования через испытательный резистор

Если повреждение отсутствует, и на отключенной зоне нет ЭПС, через  $R_n$  будет протекать ток холостого хода  $I_C$  (ток, измеряемый схемой  $I_{TA2} = I_C$ ), вызванный распределенной емкостью между контактной сетью и рельсами. Рассчитаем ток  $I_C$  и напряжение, измеряемое схемой опробова-

ния ( $U_{TV2}$ ) при селективном отключении (отключение выключателя на тяговой подстанции и посту секционирования) на межподстанционной зоне 40 км (зоны меньшей длины встречаются крайне редко). При данных условиях ток холостого хода определяется распределенной емкостью половины межподстанционной зоны (пост секционирования расположен в середине), длина равняется:  $L = 20$  км, при удельной емкости  $C_y = 20 \cdot 10^{-9}$  Ф/км [2] емкостное сопротивление составит:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C_y \cdot L} = \frac{1}{314 \cdot 20 \cdot 10^{-9} \cdot 20} = 7962 \text{ Ом}, \quad (1)$$

где  $\omega = 2 \pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$  угловая частота.

Ток холостого хода при этом:

$$I_c = \frac{U_{\text{ш}}}{\sqrt{R_{\text{и}}^2 + X_c^2}} = \frac{27500}{\sqrt{2000^2 + 7962^2}} = 3,35 \text{ А}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ш}} = 27500$  В – напряжение шин.

Схема замещения представлена на рис. 6.

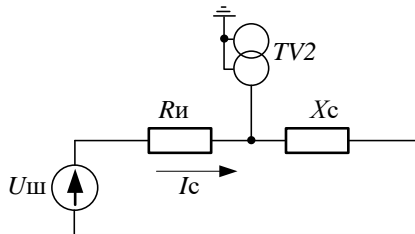


Рис. 6. Схема замещения при отсутствии повреждения и отсутствии ЭПС на зоне

При этом напряжение в контактной сети, измеряемое схемой опробования (через  $TV2$ ) снижается до:

$$U_{TV2} = I_c \cdot X_c = 3,35 \cdot 7962 = 26672 \text{ В}. \quad (3)$$

Если повреждение отсутствует, и на отключенной зоне есть ЭПС, через  $R_{\text{и}}$  будет протекать остаточный ток  $I_{\text{ост}}$ , обусловленный собственными нуждами ЭПС, схема показана на рис. 7.

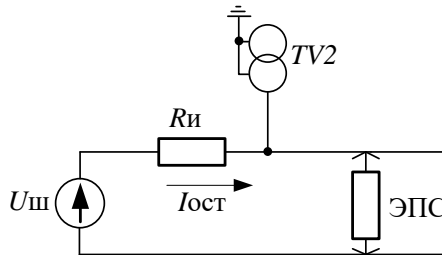


Рис. 7. Схема замещения при отсутствии повреждения и наличии ЭПС на зоне

Остаточный ток может достигать 10-11 А [10]. При этом напряжение в контактной сети, измеряемое схемой опробования, резко снижается до:

$$U_{TV2} = U_{ш} - I_{ост} \cdot R_{и} = 27500 - 10 \cdot 2000 = 7500 \text{ В.} \quad (4)$$

Рассмотрим режим устойчивого повреждения (рис. 8):

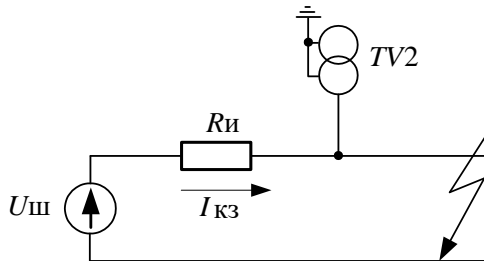


Рис. 8. Схема замещения при наличии повреждения

Ток, измеряемый схемой (сопротивление контактной сети на порядки меньше сопротивления  $R_{и}$ , поэтому им можно пренебречь):

$$I_{кз} = \frac{U_{ш}}{R_{и}} = \frac{27500}{2000} = 13,8 \text{ А.} \quad (5)$$

Напряжение, измеряемое схемой опробования, при этом стремится к нулю  $U_{TV2} \rightarrow 0$ .

Ток при КЗ сопоставим с остаточным током ЭПС, поэтому по значению тока нельзя отличить нормальный режим от режима КЗ. Реле  $KA$  в схеме нужно лишь для отстройки от емкостных токов, определение наличия КЗ осуществляется по напряжению. Уставка реле напряжения принимается 5800 В, поскольку в режиме КЗ напряжение не превышает 4000 В, а при отсутствии повреждения не опускается ниже 7000 В. При фиксации напряжения менее уставки схема опробования делает вывод о наличии повреждения и дает команду на запрет АПВ и на отключение разъединителя  $QS_{л}$  для обесточивания  $R_{и}$ . Но устойчивые повреждения успешно определяются и косвенными методами, без подпитки места повреждения током опробования.

Недостатком схемы является длительное (равное времени отключения разъединителя  $QS_{л}$  – около 1 с) подпитывание места КЗ током опробования. Если пробой изоляции сопровождался дуговым процессом, то либо дуга погаснет из-за резкого увеличения сопротивления цепи тока КЗ (на величину  $R_{и} = 2000$  Ом); либо дуга не погаснет, и тогда возможно последующее развитие повреждения из-за ее термического действия. Если дуга погасла, а повреждение осталось (неустойчивое КЗ), то схема опробования оценит такое повреждение как проходящее и разрешит АПВ, что приведет к неуспешному включению. К тому же придется заменить  $QS_{л}$ , ведь штатные разъединители рассчитаны на отключение токов до 3-5 А (при устойчивом повреждении ток отключения составит 13-14 А).

Помимо этого, при КЗ на шинах фидера контактной сети отключатся, но ток подпитки от смежной подстанции будет протекать через  $R_{и}$ , схема приведена на рис. 9.

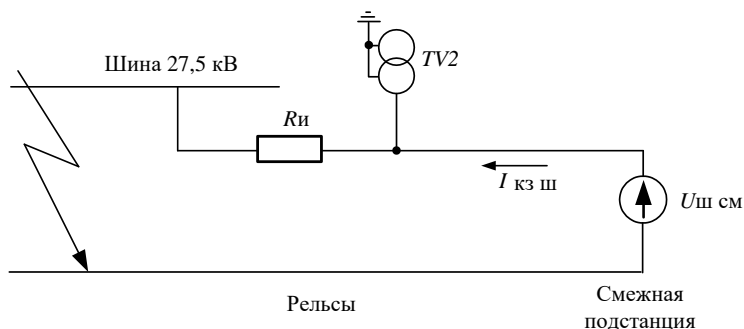


Рис. 9. Схема протекания тока при КЗ на шинах

Рассчитаем ток подпитки от смежной подстанции при КЗ на шинах (сопротивление контактной сети на порядки меньше сопротивления  $R_{и}$ ,



поэтому им можно пренебречь, также, для упрощения, не учитываем падение напряжения в контактной сети от протекания рабочего тока):

$$I_{\text{кзш}} = \frac{U_{\text{шсм}}}{R_{\text{и}}} = \frac{27500}{2000} = 13,8 \text{ А.} \quad (6)$$

При этом напряжение, измеряемое схемой опробования ( $TV2$ ), составит:

$$U_{TV2} = U_{\text{шсм}} = 27500 \text{ В.} \quad (7)$$

Для схемы опробования измеренные параметры отключения будут говорить об отсутствии замыкания, команды на отключение  $QS_{\text{л}}$  не будет. Также  $R_{\text{и}}$  не будет зашунтирован включением выключателя (при действии защиты шин 27,5кВ, АПВ фидеров не предусмотрено). Ток подпитки будет оказывать тепловое воздействие на  $R_{\text{и}}$  пока оперативный персонал не отключит  $QS_{\text{л}}$ . Укажем, что в настоящее время этот способ диагностики не применяется на отечественных железных дорогах.

Итак, недостатки рассмотренной схемы таковы: невозможность гарантированного успешного повторного включения, необходимость замены штатных разъединителей  $QS_{\text{л}}$  на отделители, риск разрушения испытательного резистора в результате теплового воздействия от тока подпитки смежной подстанции при КЗ на шинах 27,5 кВ.

#### **V. Импульсное опробование изоляции**

Схема опробования рабочим напряжением является последовательной ( $R_{\text{и}}$  подключен последовательно к шине 27,5 кВ), рассмотрим вариант параллельной схемы опробования, представленной на рис. 10. Вся логика работы реализована в низковольтной части устройства. После аварийного отключения выключателя фидера первым этапом идет анализ напряжения в отключенной контактной сети (косвенный метод определения). При устойчивом КЗ на выходе компаратора  $U <$  присутствует логическая 1, устройство формирует сигнал запрета АПВ.

Если устойчивое КЗ не выявлено (измеренное напряжение выше уставки), на выходе компаратора  $U <$  присутствует логический 0, а на выходе логического инвертора появится логическая 1, что послужит сигналом разрешения для работы генератора высоковольтных импульсов. Произойдет опробование – подача импульса напряжения с последующим измерением импульса тока.

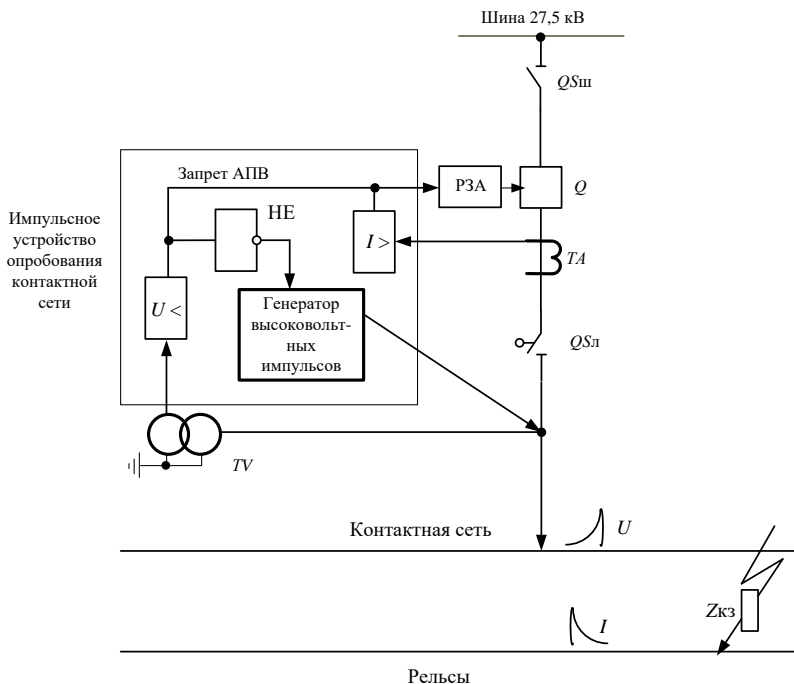


Рис. 10. Импульсная схема опробования (параллельный вариант)

В случае наличия повреждения, устройство зафиксирует импульс тока, амплитудой больше уставки. На выходе компаратора  $I >$  появится логическая 1, что приведет к запрету АПВ. Если импульс тока меньше уставки, делается вывод об отсутствии повреждения и разрешается повторное включение. В данном варианте опробования отсутствует постоянная гальваническая связь шин 27,5 кВ и отключенной контактной сети, соответственно исключены недостатки последовательного опробования.

Опробование проводится высоковольтным импульсом, воздействующим на место повреждения с сопротивлением  $Z_{кз}$ . Поскольку токоограничивающий резистор отсутствует, опробование максимально приближено к подаче рабочего напряжения при АПВ. Схема замещения при данном варианте опробования представлена на рис. 11.

Как видно из схемы замещения, ожидаемое амплитудное значение импульса тока опробования будет зависеть от амплитуды напряжения импульса опробования и сопротивления места КЗ, тяговой сети и генератора импульсов.

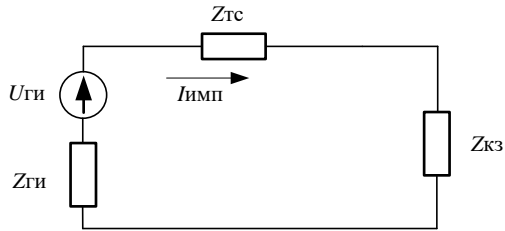


Рис. 11. Схема замещения при импульсном опробовании:  
 $Z_{тс}$  – сопротивление тяговой сети (0-10 Ом, в зависимости от места КЗ);  
 $Z_{кз}$  – сопротивление места КЗ при повреждении;  
 $Z_{гп}$  – внутреннее сопротивление генератора импульсов;  
 $U_{гп}$  – амплитудное значение импульса опробования

Исключение возможности пережога в данном варианте опробования обеспечивается сверхмалым временем импульса (при минимальном времени пережога 100-150 мс). Режим работы данной схемы опробования будет исследован дополнительно.

#### VI. Выводы

Выполнен анализ известных способов диагностики контактной сети, показывающий, что существующие методы имеют ряд недостатков и не могут обеспечить гарантированное успешное повторное включение.

Предложен вариант импульсного опробования, сочетающего в себе косвенный и активный метод определения возможности успешного повторного включения.

© Карпов И.П., 2019

© Демидов С.В., 2019

#### Библиографический список

- [1] Герман Л.А., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М: МГУПС, 2014. – 173 с.
- [2] Жарков Ю.И., Овласюк В.Я., Сухопрудский Н.Д. Автоматизация систем электроснабжения. М.: Транспорт, 1990. – 359 с.
- [3] Кузнецов В.В., Кузнецова О.В. Методы обнаружения короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог: межвуз. сб. научн. тр. Ростов-на-Дону: РГУПС, 1994. С. 175-178.
- [4] Герман Л.А., Селякин В.С. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока // Железнодорожный транспорт. 2010. № 7. С. 34-40.
- [5] СТО РЖД 07.021.1-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 1. Общие принципы и правила по-

- строения защит, блокировок и автоматики в системах электроснабжения. Введ. 2015-08-01. – 48 с.
- [6] Герман Л.А., Демидов С.В., Попов Д.С., Якунин Д.В. Простой способ поиска повреждения на контактной сети переменного тока // Локомотив. 2008. № 4. С. 45-46.
- [7] Герман В.Л. Микропроцессорное устройство контроля коротких замыканий в тяговых сетях // Электроника и электрооборудование транспорта. 2007. № 6. С. 22-27.
- [8] Герман Л.А., Герман В.Л., Жевлаков Д.А., Карпов И.П. Устройство контроля устойчивого короткого замыкания и запрета автоматического повторного включения выключателя контактной сети переменного тока, Пат. 127196 РФ, заявл. 05.09.2012; опубл. 20.04.2013. – Бюл. № 11.
- [9] Герман Л.А., Герман В.Л. Устройство контроля проходящего и устойчивого короткого замыкания в контактной сети переменного тока, Пат. 2397502 РФ, заявл. 29.04.2009; опубл. 20.08.2010. – Бюл. № 13.
- [10] Фигурнов Е.П. Релейная защита. В 2-х ч. Ч. 2. 3-е изд. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на ЖД транспорте», 2009. – 591 с.

**I.P. Karpov, S.V. Demidov**

## **METHODS OF DIAGNOSTICS OF AC CONTACT NETWORK IN POST-EMERGENCY SITUATIONS**

Branch of JSC «Russian Railways» Transenergo Gorky directorate for energy supply  
Road electrotechnical laboratory  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** Automatic reclosing (AR) is an important part of the smooth operation of the traction power supply system. Analysis of the operation of the protection of AC feeders shows that most short circuits self-destruct, as a result of thermal destruction of objects that caused insulation fault by a short circuit current; or as a result of deionization of the shorted insulating air gap in a dead time (AR time on average 4-6 sec). But there are other types of short circuits: metal short-circuit in which there is permanent contact of the elements of the catenary system, which are under different potentials (for example, as a result of the contact wire falling on the rail). Re-inclusion during such short circuits can lead to the development of an accident, the destruction of expensive equipment. To protect electrical installations from unsuccessful automatic reclosing various methods have been developed for diagnostics ac catenary system for detecting metal short circuits. An overview of these methods with the identification of advantages and disadvantages is presented in this article. For this, we used the data of electronic oscilloscopes installed at traction substations of the Gorky Railway. At the end of the article, a variant of the device for determining short circuit, previously not used in operation on railways in Russia, is presented.

**Keywords:** automatic reclosing, fault-finding after emergency outage, intermittent short circuit, insulation testing, induced voltage, metal short circuit.

### References

- [1] L.A. German and V.L. German, *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka (Automation of power supply for AC traction network)*. Moscow: MGUPS, 2014 (in Russian).
- [2] Y.I. Zharkov, V.Y. Ovlasyuk and N.D. Sukhoprudskiy, *Avtomatizatsiya sistem elektrosnabzheniya (Automation of power supply systems)*. Moscow: Transport, 1990 (in Russian).
- [3] V.V. Kuznetsov and O.V. Kuznetsova, «Metody obnaruzheniya korotkogo zamykaniya v tyagovoy seti peremennogo toka (Short circuit detection methods in AC traction network)», *Avtomatizirovannyye sistemy elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog*, 1994, RGUPS, Rostov-on-Don, pp.175-178 (in Russian).
- [4] L.A. German and V.S. Selyakin, «Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka (Automation of power supply traction AC)», *Zheleznodorozhnyy transport (The Railway Transport Magazine)*, vol. 7, no. 7, pp 34-40, 2010 (in Russian).
- [5] Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniy i peregruzki. Chast' 1. Obshchiye printsipy i pravila postroyeniya zashchit, blokirovok i avtomatiki v sistemakh elektrosnabzheniya (Protection of railway power supply systems against short circuits and overload. Part 1. General principles and rules for the construction of protections, interlocks and automatic devices in power supply systems). Standard of company JSCo «RZD» 07.021.1-2015. Introduction date: 01.08.015 (in Russian).
- [6] L.A. German, S.V. Demidov, D.S. Popov and D.V. Yakunin, «Prostoy sposob poiska povrezhdeniya na kontaktnoy seti peremennogo toka (A simple method to fault-find on a AC catenary system) », *Lokomotiv*, vol. 4, no. 4, pp. 45-46, 2008 (in Russian).
- [7] V.L. German, «Mikroprocessornoe ustrojstvo kontrolya korotkikh zamykaniy v tyagovykh setyah (Microprocessor device for monitoring short circuits in traction power networks) », *Electronics and electrical equipment of transport*, vol. 6, no. 6, pp. 22-27, 2007 (in Russian).
- [8] L.A. German, V.L. German, D.A. Zhevnikov and I.P. Karpov, «Ustroystvo kontrolya ustoychivogo korotkogo zamykaniya i zapreta avtomaticheskogo povtornogo vklyucheniya vyklyuchatelya kontaktnoy seti peremennogo toka (A device for monitoring a stable short circuit and prohibiting automatic restarting of an AC contact breaker) », R.F. Patent 127196, April 20, 2013 (in Russian).
- [9] L.A. German, V.L. German, «Ustroystvo kontrolya prokhodyashchego i ustoychivogo korotkogo zamykaniya v kontaktnoy seti peremennogo toka (Control device for passing and stable short circuit in contact AC network)», R.F. Patent 2397502, Aug. 20, 2010 (in Russian).
- [10] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita. V 2-kh chastyakh. Chast' 2 (Relay protection. In 2 parts. Part 2.)* 3rd ed. Moscow: GOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrabotke i ispolzovaniyu na zh.d. transporte», 2009 (in Russian).