

## Проблемы однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью

СЕМЕНОВА Е.Ю.

*Рассмотрен вопрос о нормальном функционировании высоковольтных линий продольного электроснабжения железных дорог с изолированной нейтралью. На железных дорогах питание системы сигнализации СЦБ осуществляется высоковольтными воздушными линиями (ВЛ) 6–10 кВ. Из-за необходимости бесперебойного питания системы сигнализации линии выполнены по схеме с изолированной нейтралью, поэтому замыкание фазы на землю не приводит к отключению всей линии и имеется временной промежуток на отыскание и устранение неисправностей. Длительное состояние ВЛ СЦБ с заземленной фазой недопустимо. Возникновение такого же второго замыкания на другой фазе в любой точке сети приводит к двухфазному короткому замыканию на землю, что может вызвать серьезную аварию и исключить возможность питания аппаратуры СЦБ. Наиболее быстрым и перспективным способом обнаружения аварии является методика определения расстояния до места однофазного замыкания на землю.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** энергосистема, изолированная нейтраль, замыкание на землю, переходное сопротивление, определение места замыкания

В сетях с изолированной нейтралью наиболее проблематичным является аварийный режим замыкания на землю с большим переходным сопротивлением. Переходное сопротивление при замыкании фазы на землю может изменяться в широких пределах, однако существующие приборы недостаточно точно указывают место, где произошло замыкание фазы на землю. Значения токов замыкания на землю в этих сетях относительно невелики и во многих случаях на один или даже два порядка меньше токов нагрузки. Поиск аварийного места занимает много рабочего времени ремонтных бригад и не укладывается в отведенное ПУЭ время, что приводит к необходимости отключения линии. В этом случае система с изолированной нейтралью теряет свое основное преимущество и требуется резервная линия для поддержания питания потребителей первой категории. На железнодорожном транспорте для обеспечения бесперебойного питания аппаратуры СЦБ в обязательном порядке эти линии резервируются. Для резерва используют либо такую же линию с изолированной нейтралью, расположенную рядом, либо используют линию, по системе ДПП применяемую в качестве основной для питания инфраструктуры данного участка. Однако для бесперебойного питания оборудование СЦБ и этих мер бывает недостаточно. Если в качестве резервной линии используют линию ДПП, то при переводе СЦБ на ДПП, а в этот же момент на ДПП возникает короткое замыкание (КЗ) на одном из множества различных потребителей, линия тоже обесточивается. Аппаратура СЦБ прекращает

функционировать, это и приводит к остановке движения по всей межподстанционной зоне.

Наиболее трудозатратным является поиск однофазного замыкания на землю через переходное сопротивление. Рассмотрим схему однофазного замыкания на землю через переходное сопротивление (рис. 1).

Для упрощения анализа ток нагрузки ВЛ при КЗ не учитывается, т.е. рассматривается ВЛ, включенная с одной стороны. При дистанционном определении места повреждения ВЛ на основе односторонних измерений параметров аварийного режима (полного сопротивления, тока или напряжения) возникает погрешность, обусловленная переходным сопротивлением. Под переходным сопротивлением  $R_{\text{пр}}$  принято называть [1] суммарное сопротивление цепи, по которой протекает ток повреждения между фазой и землей при КЗ на землю. Переходное сопротивление  $R_{\text{пр}}$  состоит из сопротивления дуги, заземлений металлических и железобетонных опор, сопротивления между прово-

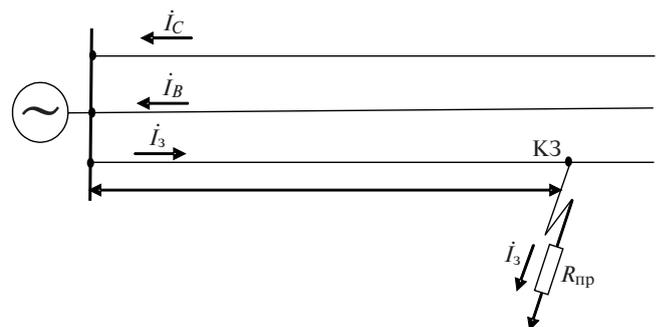


Рис. 1

дом и землей (при падении на землю), а также сопротивления деревянных опор. Оценим каждую составляющую переходного сопротивления при условиях КЗ на опору [2].

В начальный момент времени длина дуги может быть принята равной длине пути перекрытия с провода на землю. В этом случае значение сопротивления дуги можно определить по выражению:

$$R_d = 1,05l_d / I_d, \quad (1)$$

где  $l_d$  – длина дуги, м;  $I_d$  – действующее значение тока в дуге, кА.

При однофазном КЗ на линиях с деревянными опорами длина дуги определяется длиной перекрытия всего пути от токоведущего провода до земли.

Для оценки влияния переходного сопротивления  $R_{пр}$  на точность работы фиксирующих приборов, измеряющих полное сопротивление (расстояние) до места однофазного КЗ, рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжения, подводимых к измерительным органам (рис. 2).

Напряжение и ток поврежденной фазы определяется в соответствии с известным выражением [1], которое применительно к замыканию фазы  $A$  на землю преобразуется:

$$\dot{U}_A = \dot{Z}'_{уд1} l (\dot{I}_A + k \dot{I}_0). \quad (2)$$

Как видно из векторной диаграммы, модуль сопротивления  $Z'_{из}$  (расстояние  $l'$ ) больше действительного  $Z_{из}$  ( $l_{из}$ ) на значение  $\Delta Z$  ( $\Delta l$ ). Это значение определяется с учетом проникновения в цепь переходного сопротивления фазного тока повреждения  $\dot{I}_A$  и тока нулевой последовательности  $\dot{I}_0$ , которые для рассматриваемого случая совпадают по фазе. При построении векторной диаграммы фазный ток принят равным утроенному значению тока нулевой последовательности.

Фазный угол  $\varphi$  определяется по выражению:

$$\varphi_k = \arctg \frac{x_{уд1} I_A + (x_{уд0} - x_{уд1}) I_0}{r_{уд1} I_A + (r_{уд0} - r_{уд1}) I_0}, \quad (3)$$

где  $x_{уд1}, r_{уд1}$  – удельные индуктивное и активное сопротивления ВЛ прямой последовательности соответственно, Ом/км;  $x_{уд0}, r_{уд0}$  – то же нулевой последовательности, Ом/км.

Из-за наличия переходного сопротивления в месте замыкания фазы на землю фазовый угол  $\varphi'_k$  линии не остается постоянным. Его значение обратно пропорционально сопротивлению  $R_{пр}$  и может быть рассчитано по выражению, полученному на основании векторной диаграммы:

$$\varphi'_k = \arctg \frac{x_{уд1} I_A + (x_{уд0} - x_{уд1}) I_0}{(r_{уд1} l + R_{пр}) I_A + (r_{уд0} - r_{уд1}) I_0}. \quad (4)$$

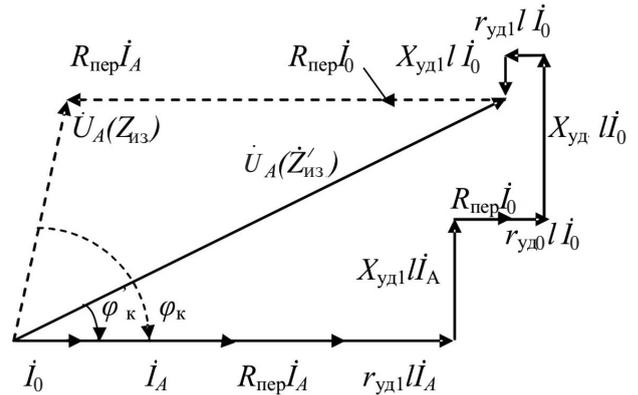


Рис. 2

Приняв  $I_A = 3I_0$ , получим:

$$\varphi'_k = \arctg \frac{(2x_{уд1} + x_{уд0})l}{(2r_{уд1} + r_{уд0})l + 4R_{пр}}. \quad (5)$$

Из векторной диаграммы с учетом (5) может быть получена зависимость измеренного модуля полного сопротивления от переходного сопротивления в месте замыкания:

$$Z'_{из} = z_{уд} l' = \frac{(2x_{уд1} + x_{уд0})l}{\sin \arctg \frac{(2x_{уд1} + x_{уд0})l}{(2r_{уд1} + r_{уд0})l + 4R_{пр}}}. \quad (6)$$

Действительное расстояние до места замыкания на землю может быть определено по векторной диаграмме решением косоугольного треугольника с учетом (3) и (4):

$$Z_{из} = z_{уд} l = \frac{z'_{из} \sin \varphi_k}{\sin [180^\circ - (\varphi_k - \varphi'_k + \varphi'_k)]} = \frac{z'_{из} \sin \varphi'_k}{\sin \varphi_k}. \quad (7)$$

Если пренебречь тем, что фазовые углы сопротивлений  $z_{из}$  и  $z'_{из}$  различны, то погрешность измерения расстояния определяется как разность значений  $l$  и  $l'$ , которые можно получить из (7) и (6):

$$\Delta l = l - l' = \frac{z_{из} - z'_{из}}{z_{уд1}}, \quad (8)$$

откуда, выразив  $z'_{из}$  через  $z_{из}$ , получим:

$$\Delta l = l - \frac{l \sin \varphi_k}{\sin \varphi'_k} = l \left( 1 - \frac{\sin \varphi_k}{\sin \varphi'_k} \right). \quad (9)$$

На рис. 3 показаны полученные зависимости погрешности измерения расстояния до места замыкания фазы на землю от переходного сопротивления для различных КЗ на линии.

Погрешность прямо пропорциональна переходному сопротивлению и уменьшается по мере удале-

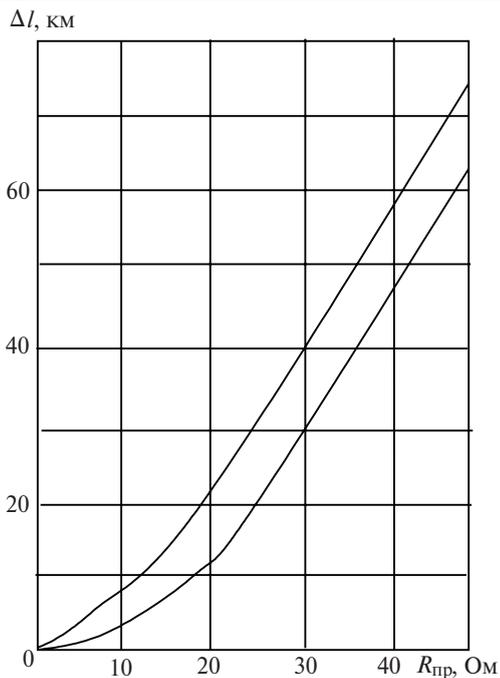


Рис. 3

ния от шин питающей подстанции. Изменение значения погрешности  $\Delta l$  для различных значений переходного сопротивления  $R_{пр}$  при удалении от подстанции показано на рис. 4.

Как видно из графика, погрешность  $\Delta l$  имеет большие значения и уже при  $R_{пр} = 50$  Ом не представляется возможным даже приблизительно определить район поиска замыкания фазы на землю. Однако переходные сопротивления бывают намного выше 50 Ом, так например, КЗ через тело деревянной опоры.

Системе с изолированной нейтралью присущи сложные виды повреждений, к которым относятся

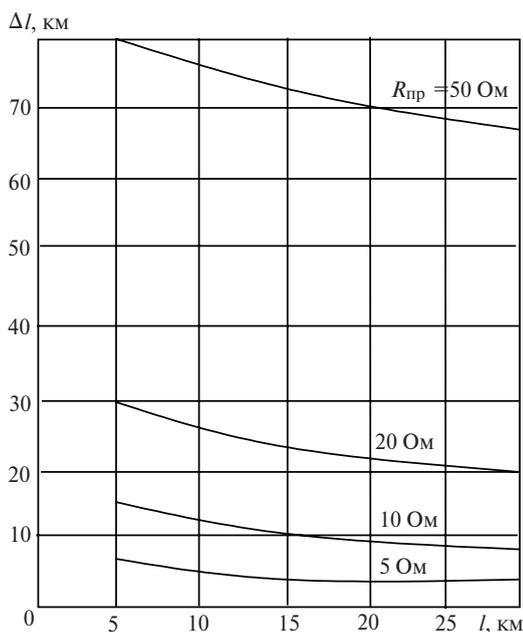


Рис. 4

повреждения, при которых присутствует сочетание нескольких повреждений одновременно. Так например, при разрыве провода линии у изолятора упавший на землю конец провода вызывает появление однофазного КЗ с разрывом фазы. Соотношения электрических величин, подобные имеющимся при замыканиях с разрывами проводов фаз, возникают также при отказах в работе части фаз автоматических выключателей. Например, междуфазное замыкание линии через землю разных фаз либо с одним переходным сопротивлением, либо сразу с двумя. В процессе развития аварии возможны переходы от одного вида повреждения к другому, чаще с охватом большего числа фаз.

Рассмотрим одно из самых сложных повреждений – двухфазное КЗ на землю в разных точках через двойное большое переходное сопротивление, соизмеримое с сопротивлением нагрузки (рис. 5). Двойное КЗ на землю возникает обычно в местах с ослабленной изоляцией. Соотношения электрических величин в общем случае определяются с использованием метода симметричных составляющих. При этом предполагается, что повреждения произошли на фазах  $B$  и  $C$  двух линий.

В сети на участке между местами повреждений  $K_B$  и  $K_C$  появляются напряжения  $\dot{U}_0$  и токи  $\dot{I}_0$  нулевой последовательности, так как имеется для них дополнительный путь через землю:

$$\dot{I}_0 = (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) / 3.$$

Вне этого участка несимметрия сохраняется, но токи  $\dot{I}_0$  отсутствуют; напряжения  $\dot{U}_0$  остаются. В эквивалентной трехлучевой схеме замещения полный ток в неповрежденной фазе  $A$  отсутствует. Формально он возникает при обратном превращении трехлучевой схемы в реальную. Физически он определяется наличием взаимоиндукции между неповрежденной и поврежденной фазами. Его значение зависит от параметров схемы и расстояния между  $K_B$  и  $K_C$ . При совпадении точек  $K_B$  и  $K_C$  повреждение превращается в междуфазное КЗ в одной точке. Сопротивление земли в этом случае не учитывается. Токи  $\dot{I}_0$ , а также  $\dot{I}_A$  при условном отсутствии нагрузки линии отсутствуют. Определение

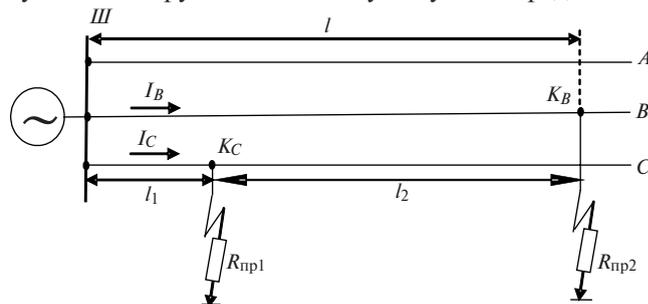


Рис. 5

токов  $\dot{I}_A, \dot{I}_B,$  и  $\dot{I}_C$  при расположении КВ и КС по краям передачи, сопротивление которой велико по сравнению с сопротивлением системы  $Z_{ЭК}$ , принимается равным нулю. Тогда для трех контуров прохождения токов:

$$\begin{aligned} \dot{E}_B - \dot{E}_C &= \dot{Z}_{Lл} \dot{I}_A + \dot{Z}_{м.л} (\dot{I}_B + \dot{I}_C); \\ \dot{E}_B - \dot{E}_C &= \dot{Z}_{Lл} \dot{I}_B + \dot{Z}_{м.л} (\dot{I}_B + \dot{I}_C); \\ \dot{E}_B - \dot{E}_C &= \dot{Z}_{Lл} \dot{I}_C + \dot{Z}_{м.л} (\dot{I}_B + \dot{I}_C), \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} \dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C &= (\dot{E}_B - \dot{E}_C) / (\dot{Z}_{Lл} \dot{I}_C + 2\dot{Z}_{м.л}) = \\ &= (\dot{E}_B - \dot{E}_C) / \dot{Z}_{0л}. \end{aligned}$$

Таким образом, комплексы токов во всех трех фазах в рассматриваемом случае равны, т.е. имеют только составляющие нулевой последовательности. Сдвиг по фазе  $\varphi_0 = \dot{U}_0 \wedge \dot{I}_0$  имеет сильно изменяющиеся значения, существенно отличающиеся от  $\varphi_0 \approx -90^\circ$  в связи с влиянием на него переходных сопротивлений  $R_{пр}$ , которые на  $\varphi_0$  не влияют.

Рассмотрим фазные и междуфазные напряжения при замыкании на землю (рис. 6).

Из результатов исследований видно, что определение мест повреждений при сложных КЗ еще сложнее, чем определение мест повреждения при замыкании на землю в одном месте. В патентах Франции и США сделана попытка реализовать определитель мест междуфазного замыкания через большое переходное сопротивление.

На основе уравнения для любого момента времени мгновенное значение междуфазного (линейного) напряжения равно:

$$u_{AB} = u_B - u_A = lL \frac{di_{AB}}{dt} + lri_{AB} + R_{пр} i'_{AB} = xv + lW,$$

где  $i_{AB} = i_A + i_B$  — мгновенное значение тока со стороны ВЛ, где проводятся измерения;  $i'_{AB}$  — то

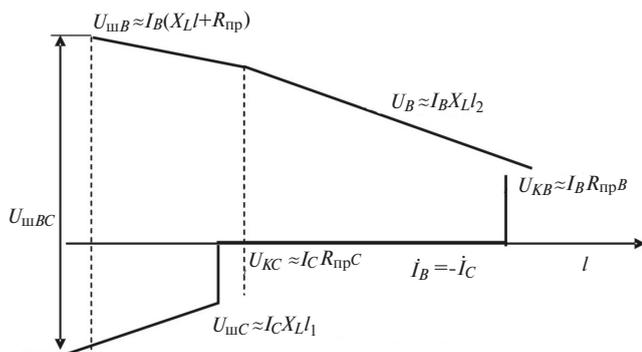


Рис. 6

же с противоположной стороны линии;  $L$  и  $r$  — индуктивность и активное сопротивление на единицу длины системы «провод — провод» (прямой последовательности в расчете на два провода);  $R_{пр}$  — переходное сопротивление;  $k$  — коэффициент, учитывающий падение напряжения на переходном сопротивлении от тока с противоположного конца ВЛ;  $x = l + kR_{пр} / r$ ;  $v = ri_{AB}$ ;  $w = L \frac{di_{AB}}{dt}$ .

Измеряя ток  $i_{AB}$ , его производную  $di_{AB} / dt$  и напряжение  $u_{AB}$  для двух произвольных моментов времени  $t_1$  и  $t_2$ , получаем два уравнения:

$$\begin{aligned} u_{AB1} &= xv_1 + lw_1; \\ u_{AB2} &= xv_2 + lw_2. \end{aligned}$$

Решение этих уравнений относительно неизвестных  $x$  и  $l$  позволяет найти искомое расстояние:

$$l = \frac{u_{AB1} u_{AB2} - x_{AB2} v_1}{w_1 v_2 - w_2 v_1} = \frac{u_{AB1} i_{AB2} - u_{AB2} i_{AB1}}{L \left[ \left( \frac{di_{AB1}}{dt} \right) - \left( \frac{di_{AB2}}{dt} \right) \right]}$$

Если фиксировать мгновенное значение тока для момента перехода тока через нуль, можно записать

$$(u_{AB})_{i=0} = l(w)_{i=0}; \quad l = \frac{(u_{AB})_{i=0}}{L \left( \frac{di_{AB}}{dt} \right)_{i=0}}$$

Недостатком рассмотренной методики определения расстояния места повреждения является весьма приблизительный учет влияния тока с противоположной стороны ВЛ ( $i'_{AB}$  в общем случае не совпадает по фазе с током  $i_{AB}$ ), а также не учитываются свойства возникновения и горения дуги в месте повреждения.

Если ток  $i'_{AB}$  не совпадает по фазе с током  $i_{AB}$ , то коэффициент  $k$  в два фиксированных момента времени имеет разные значения и значение  $l$  определяется с погрешностью. При переходе тока  $i_{AB}$  через нуль ток  $i'_{AB}$  имеет какое-то значение (в зависимости от сдвига фаз), что также приводит к погрешности. Только когда произойдет устойчивое горение дуги и установившийся процесс дуги  $R_{пр} = R_d$  станет постоянным, тогда вблизи перехода через нуль результирующего тока с обоих концов линии ( $i = i_{AB} + i'_{AB}$ ) напряжение на дуге может быть иным.

Если исключить или принять малую вероятность случайного попадания измерений в интервал вблизи перехода тока  $I$  через нуль, то можно записать

$$u_{AB} = lL \frac{di_{AB}}{dt} + lri_{AB} + u_d.$$

В этом случае, измеряя значения  $u_{AB1}$ ,  $u_{AB2}$ ,  $i_{AB1}$ ,  $i_{AB2}$  и  $\frac{di_{AB1}}{dt}$ ,  $\frac{di_{AB2}}{dt}$ , можно получить для двух моментов времени два решения систем из двух уравнений вида:

$$l = \frac{u_{AB1} - u_{AB2}}{L \left[ \left( \frac{di_{AB1}}{dt} \right) - \left( \frac{di_{AB2}}{dt} \right) \right] + r(i_{AB1} - i_{AB2})};$$

$$l' = \frac{u_{AB1} + u_{AB2}}{L \left[ \left( \frac{di_{AB1}}{dt} \right) + \left( \frac{di_{AB2}}{dt} \right) \right] + r(i_{AB1} - i_{AB2})}.$$

Эта методика используется и для однофазного замыкания на землю, при этом мгновенное значение напряжения фазы  $A$ :

$$u_A = xv_A + lw_A; \quad v_A = r_0 i_0;$$

$$w_A = r(i_A - i_0) + L \frac{d}{dt}(i_A - i_0) + L_0 \frac{di_0}{dt},$$

где  $x = l + (kR_{\text{пр}} / r_d)$ ;  $l$  – расстояние до места КЗ;  $kR_{\text{пр}}$  – переходное сопротивление в месте повреждения, умноженное на постоянный коэффициент (учет тока нулевой последовательности с противоположного конца линии);  $r$  и  $r_0$  – удельное сопротивление прямой и нулевой последовательностей соответственно;  $L$  и  $L_0$  – индуктивность прямой и нулевой последовательностей соответственно;  $i_A$  – мгновенное значение тока фазы  $A$  со стороны конца ВЛ, где проводятся измерения;  $i_0$  – мгновенное значение тока нулевой последовательности с той же стороны.

Для двух моментов времени получаем искомое расстояние  $l$  при измерении в момент перехода тока  $i_0$  через нуль (момент  $t_0$ ):

$$l = \frac{(u_A)_{t_0}}{(w_A)_{t_0}} = \frac{(u_A)_{t_0}}{r(i_A)_{t_0} + L \frac{d}{dt}(i_A - i_0)_{t_0} + L \left( \frac{di_0}{dt} \right)_{t_0}}.$$

По объему эта методика требует много рабочего времени, высокой квалификации персонала, имеет большую погрешность и многократно используется, хотя и на короткое время.

Длительное состояние в аварийном режиме ВЛ СЦБ с заземленной фазой недопустимо и провоцирует возникновение второго такого же замыкания на другой фазе в любой точке сети. Это и приведет к сложному двухфазному короткому замыканию на землю – уже достаточно серьезной аварии: невозможность питания аппаратуры СЦБ. За этим последует обесточивание сигнальных точек на дли-

тельный промежуток времени и как следствие – остановка движения поездов на всем перегоне.

К большому сожалению, задачу измерением параметров тока замыкания на землю не решить из-за специфики его формирования; значение и фаза тока не зависят от расстояния до места замыкания на землю. В большинстве случаев место замыкания фазы на землю ВЛ СЦБ имеет большое переходное сопротивление, которое изменяется от единиц Ом до кОм. Скрытые замыкания на землю (как правило, с большим переходным сопротивлением) визуально определить невозможно, что приводит к большим потерям рабочего времени ремонтных бригад. В некоторых случаях поиск неисправностей занимает месяцы, что влияет на бесперебойность движения поездов. Рассмотренные методики и их использование требуют также больших затрат рабочего времени и главное, выдают заведомо неточные результаты из-за неучета многих влияющих факторов.

Наиболее перспективным является устройство для определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в сетях 6–35 кВ электрических систем с изолированной или компенсированной нейтралью [3]. Устройство представляет собой комплекс измерительной схемы, коммутирующих устройств и измерительно-вычислительного микропроцессорного устройства для записи и обработки информации.

Для подготовки к измерениям проводится сборка измерительной схемы, которая осуществляется отключением поврежденной фазы линии от питания и подключения ее с обеих сторон к неповрежденной фазе. На освободившийся полюс выключателя, между ним и землей, включается токоограничивающий резистор. Замеряются токи по участвующим в измерениях фазам линии, и по отношению этих токов определяется расстояние до места повреждения. Питание схемы осуществляется рабочим источником переменного тока. Однако возникают токи через межфазные емкости. Составляющая этого тока замыкается через емкости «фаза – земля» проводов неповрежденных фаз линии. Влиянием этого пренебречь нельзя, так как провод, по которому ток возвращается на подстанцию, расположен близко от проводов, участвующих в измерении.

Полученная кривая абсолютной погрешности свидетельствует о том, что измерительные токи менее 1 А дают погрешность выше 30%. По этой причине для измерений используется значение токов более 100 А, что неприемлемо для маломощных линий электропередачи (какими являются линии СЦБ). Кроме того, если переходное сопротивление короткого замыкания около 1 кОм и необходимый ток больше 100 А, то измеряемое напряжение

намного превысит возможности изоляции линии, что в результате может привести к непоправимым последствиям [4]. Для маломощных электрических сетей с изолированной нейтралью с напряжением 6(10) кВ, какой является ВЛ СЦБ и во многих случаях использующая деревянные опоры, применить это устройство невозможно. Однако ценным в методике измерения является исключение переходного сопротивления из расчетов при определении места замыкания фазы на землю.

Для питания схемы измерения всегда применяется источник переменного тока и в этом устройстве тоже, и в приведенной ранее методике, и в различных других устройствах, выпускаемых промышленностью. Возникновение токов через межфазные емкости, взаимные индуктивности между фазами линии вносят дополнительные погрешности и в без того сложный процесс вычисления места замыкания фазы на землю. Для исключения этих дополнительных погрешностей необходимо перейти к использованию источника постоянного тока [5]. Кроме того, в качестве источника необходимо использовать источник тока. Если обычно все используют в качестве источника питания измерительных схем источник напряжения, то в решении поставленной задачи это неприемлемо. В этом случае расчетная система уравнений не будет иметь решения, так как количество неизвестных превышает число уравнений. По этой причине вводятся начальные условия, т.е. одно и то же значение тока является объединяющим для двух схем (или режимов) и источник должен обладать высокой стабильностью. Стабилизация тока напрямую связана с значением погрешности измерения:

$$I_{cT} = I_{cT(1cx)} = I_{cT(2cx)} = I_2 + I_3.$$

Составим систему уравнений исходя из эквивалентных схем (см. рис. 7):

$$\left. \begin{aligned} U_{1cx} &= I_{cT} (R_1 + R_2); \\ U_{2cx} &= I_{cT} R_1 + I_2 R_2. \end{aligned} \right\}$$

Преобразовав эти уравнения, получим:

$$U_{2cx} = U_{1cx} + R_2 (I_2 - I_{cT})$$

или

$$-(U_{1cx} - U_{2cx}) = -R_2 (I_{cT} - I_2).$$

После преобразования находим искомое значение сопротивления от подстанции до места замыкания фазы на землю:

$$R_2 = \frac{U_{1cx} - U_{2cx}}{I_{cT} - I_2} = \frac{U_{1cx} - U_{2cx}}{I_3}.$$

Расстояние  $l$  от подстанции до места замыкания на землю равно  $l = kR_2$ .

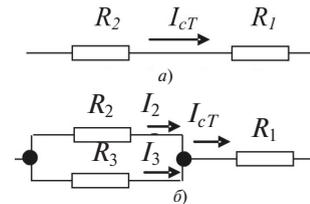


Рис. 7

Здесь  $R_1$  – переходное сопротивление замыкания фазы на землю;  $R_2$  – сопротивление поврежденной линии от источника до места замыкания на землю;  $R_3$  – сопротивление неповрежденной линии и остатка поврежденной линии до места замыкания на землю;  $I_{cT}$  – один и тот же стабилизированный ток источника для первой и второй схем или режима измерения;  $I_2$  – ток через  $R_2$  в схеме рис. 7,а;  $I_3$  – то же через  $R_3$  в схеме рис. 7,б;  $U_{1cx}$  – напряжение, подаваемое на схему рис. 7,а;  $U_{2cx}$  – то же на схему рис. 7,б;  $b$  – расстояние от подстанции до места замыкания на землю, равно  $kR_2$ ;  $k$  – коэффициент перевода сопротивления в расстояние в зависимости от индивидуальных параметров данной линии.

Структурная схема устройства для определения места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью представлена на рис. 8.

Устройство состоит из двух схем измерения, которые переключаются ключом  $K$ . В устройство входят: 1 – стабилизированный источник тока постоянного тока; 2 – устройство управления; 3 – пикоразностный вольтметр; 4 – датчик тока; 5 – арифметическое устройство; 6 – функциональный корректор; 7 – индикатор информации.

Устройство работает следующим образом: собирается измерительная схема, при которой отключается питание линии, и на подстанции поврежденная фаза соединяется с любой из неповрежденных фаз. В неповрежденную фазу устанавливается датчик тока 4 (измерительный шунт). На дальнем конце линии подключается ключ  $K$  (любое коммутирующее устройство на 1 А и более) в разомкнутом положении. Подключенное устройство при разомкнутом ключе  $K$  питает схему постоянным током (менее 1 А). Пиковый вольтметр 3, запускае-

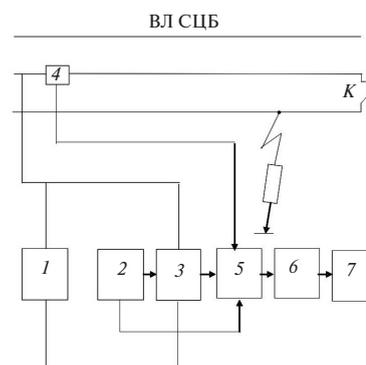


Рис. 8

мый устройством управления 2, измеряет уровень полученного напряжения и записывает в память. После полученной вольтметром 3 информации с подстанции на дальнем конце линии включается ключ К. Устройство управления 2 подает повторно команду на вольтметр 3, который выполняет функцию вычитания полученного напряжения из напряжения, предварительно заложенного в память. Значение разности этих напряжений подается в арифметическое устройство 5, которое выполняет функцию деления полученной разности напряжений на ток, уровень которого снимается с датчика тока 4. Значение тока датчика 4 является разностью между общим стабилизированным током питания и током поврежденной линии. Полученное значение сигнала пропорционально значению сопротивления линии от подстанции до места замыкания фазы на землю. В дальнейшем этот сигнал преобразуется в функциональном корректоре 6 по имеющейся программе для данной ВЛ СЦБ, учитывающей продольную неоднородность линии (кабельные вставки, разные типы и диаметры проводов). Кроме того, корректор 6 преобразует значение сопротивления в расстояние от подстанции до места замыкания на землю и впоследствии выводит на индикатор информации 7. Устройство обеспечивает определение места короткого замыкания в линиях малой мощности при очень малых испытываемых

тых токах и большом переходном сопротивлении в месте короткого замыкания фазы на землю и позволяет резко сократить время поиска повреждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Айзенфельд А.И. Определение мест повреждения ВЛ с помощью односторонних измерений. – Энергетик, 1976, № 9.
3. Пат. РФ № 2096795 на изобретение. Устройство для определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6–35 кВ электрических систем с изолированной или компенсированной нейтралью (варианты)/В.Н. Пупынин, В.Х. Нгуен, 1998.
4. Нгуен В.Х. Определение расстояния до места замыкания на землю в сетях 6–35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью: Дис... канд. техн. наук. М., 1998.
5. Пат. РФ № 2260812 на изобретение. Устройство для определения места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью/Ю.В.Иодко, Е.Ю. Семенова, В.Д. Кислик, 2005.

[13.12.2018]

*А в т о р: Семенова Елена Юрьевна окончила Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта в 1990 г. В 2003 г. защитила кандидатскую диссертацию «Активные методы и средства снижения электрических влияний контактной сети переменного тока на линии продольного электроснабжения с изолированной нейтралью». Доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта» Российского университета транспорта (МИИТ).*

Elektrichestvo, 2019, No. 5, pp. 12–18

DOI:10.24160/0013-5380-2019-5-12-18

## Problems Concerned with Single-Phase Ground Faults in Isolated Neutral Networks

SEMENOVA Elena Yu. (Russian University of Transport) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*Matters concerned with normal operation of high-voltage isolated neutral power lines for longitudinal power supply of railways are considered. In railways, the signaling, centralization and blocking (SCB) system takes power supply from 6–10 kV high-voltage overhead power lines. Since uninterrupted power supply to the signaling system is required, the power lines are made according to the isolated neutral circuit scheme. A single-phase ground fault in such system does not lead to disconnection of the entire line, and a certain interval of time for locating and removing the fault is available. However, long-term operation of the overhead line supplying power to the railway SCB system with a ground fault in one phase is not admissible. A similar fault in another phase at any point of the network leads to a two-phase short-circuit ground fault, which leads to a serious emergency involving loss of power supply to the SCB system equipment. The technique of determining the distance to the single-phase ground fault is the most rapid and promising fault detection method.*

**K e y w o r d s:** power system, isolated neutral, earth-fault, fault resistance, fault location

## REFERENCES

1. Fedoseyev A.M. Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem. Releynaya zashchita setey (Relay protection of electric power systems. Relay protection of networks). Moscow, Energoatomizdat, 1984.
2. Ayzenfel'd A.I. Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist), 1976, No. 9.
3. Pat. RF № 2096795 na izobreteniyey. Ustroystvo dlya opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV elektricheskikh sistem s izolirovannoy ili kompensirovannoy neytral'yu (varianty) (RF Invention Patent No. 2096795. A device for locating a single-phase ground fault in 6–35 kV networks of electric

systems with an isolated or compensated neutral (versions))/V.N. Pupyinin, V.Kh. Nguen. Bulletin of inventions, 1998.

4. Nguen V.Kh. Opredeleniye rasstoyaniya do mesta zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV s izolirovannoy ili kompensirovannoy neytral'yu: Diss. ... kand. tekhn. nauk (Determination of the distance to the ground fault place in 6–35 kV networks with an isolated or compensated neutral: Diss. ... Cand. Sci. (Eng.), Moscow, 1998.

5. Pat. RF № 2260812 na izobreteniyey. Ustroystvo dlya opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu (RF Invention Patent No. 2260812. A device for locating a single-phase ground fault in isolated neutral networks)/Yu.V. Iodko, Ye.Yu. Semenova, V.D. Kisluk, 2005.

[13.12.2018]