

В.В. Коренский, канд. техн. наук

(Россия, Мирный, филиал Якутского государственного университета)

СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ КОНТАКТНЫХ СЕТЕЙ РУДНИЧНОЙ ЭЛЕКТРОВОЗНОЙ ОТКАТКИ ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ

Трудности контроля утечек тока в шахтных контактных сетях, а, следовательно, и создание средств защитного отключения объясняется тем, что в качестве обратного провода используются рельсы, имеющие электрический контакт с землей. При этом и тяговые токи, и токи утечки замыкаются по одному и тому же контуру. Для надежной и достоверной индикации каналов утечки необходимо найти или искусственно создать отличительные признаки, по которым можно было бы различать технологические (нагрузочные) и нетехнологические (обусловленные утечками) токи. Это достигается в средствах защитного отключения, основанных на контроле утечек тока наложенным оперативным напряжением при частотном разделении каналов рабочего и оперативного тока. Одним из методов, обеспечивающим контроль токов утечки, является наложение оперативного напряжения повышенной частоты с обязательным заграждением технологических нагрузок по оперативному току. Существует три разновидности этого метода.

В одном из них заграждение электровозов по оперативному току осуществляется включением в их силовую цепь параллельного колебательного контура, настроенного на частоту оперативного напряжения. На первый взгляд, такое решение является исчерпывающим, так как сопротивление параллельного контура на частоте настройки $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ при $R_1 \ll \omega L$ и $R_2 \ll \frac{1}{\omega C}$ стремится к до-

статочно большой величине при соответствующем выборе параметров катушки и типа конденсаторов. На постоянном токе сопротивление дросселя R_l может быть снижено до требуемой величины соответствующим выбором сечения обмотки [1].

В действительности же возможности такого метода чрезвычайно ограничены по следующим причинам. Совершенно очевидно, что омическое сопротивление контура не должно заметно влиять на тяговые характеристики электровозов, и поэтому величина его ограничена неравенством

$$R_1 \ll \frac{\Delta U_g}{I_{э.н.}}$$

где ΔU_g - допустимое падение напряжения на заградительном контуре; $I_{э.н.}$ - номинальное значение тока электровоза.

Принимая согласно "Основным техническим требованиям к системам защиты от токов утечки для шахтных контактных сетей" $\Delta U_g \leq 2\%$ от напряжения на зажимах тяговой подстанции и отождествляя $I_{э.н}$ с часовым током электровагона 14КР-1, 14КР2А или К14, получим допустимое значение $R_1 \leq 0,013$ Ом.

С другой стороны, для достоверного контроля утечки тока необходимо, чтобы сопротивление заградительного контура на частоте оперативного напряжения было существенно больше сопротивления уставки срабатывания $R_{уст}$ устройства защитного отключения. Учитывая, что по соображениям обеспечения электробезопасности при напряжении питания контактной сети $U_{к.с} = 300$ В сопротивление уставки срабатывания $R_{уст} = 6000$ Ом, логично потребовать, чтобы сопротивление контура

$$R_k \geq 10R_{уст} = 6 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Учитывая, что эквивалентное сопротивление параллельного колебательного контура на резонансной частоте может быть выражено через его волновое сопротивление и сопротивление потерь $R_k = \rho^2 / R_n$ или через добротность контура и его волновое сопротивление $R_k = Q\rho$, получим выражение, позволяющее определить требуемую добротность контура, обеспечивающего качественное заграждение электровагонов по оперативному току при пренебрежимом влиянии на работу тяговых двигателей,

$$Q = \sqrt{\frac{R_k}{R_n}}.$$

В этой формуле сопротивление потерь R_n следует принять равным величине, полученной по допустимому падению напряжения (0,013 Ом), в силу следующих соображений. Во-первых, к омическому сопротивлению дросселя следует прибавить сопротивление потерь конденсатора в последовательной эквивалентной схеме замещения. Во-вторых, активное сопротивление контура на частоте оперативного напряжения значительно выше его омического сопротивления за счет добавок, обусловленных потерями на вихревые токи в толще провода, эффекта близости и экранирующего влияния ферромагнитных масс, находящихся в непосредственной близости от контура, и т.д.

Дополнительные составляющие могут превосходить сопротивление контура по постоянному току, что приводит к отрицательному ТКС дросселя, намотанного медным проводом. В силу изложенного сопротивление потерь контура можно принять равным 0,05 Ом. Тогда, с учетом ранее оговоренной величины R_k , добротность контура должна быть не менее 1000. Теоретически создание такого контура возможно, если применить термостатированный контур без

ферромагнитного сердечника, защищенного многослойным экраном, внутри которого проложен медный или алюминиевый лист, толщиной не менее глубины проникновения электромагнитной волны на частоте оперативного напряжения, по внутренней поверхности которого проложен лист смеси, состоящей из одной части полистирольной муки и 3 – 5 частей карбонильного железа [2], возимого на специальной тележке. Однако практическая реализация такого решения лишена всякого смысла.

Вторая разновидность метода частотного зондирования контактной сети базируется на более сложных схемотехнических приемах, основанных на использовании колебательного контура. Один из них реализован в различных вариантах защиты РУКС [1]. Здесь применено векторомерное измерительное устройство с опережающим углом коммутации, в предположении, что человек представляет собой активно-емкостную структуру. Заградительный контур на электровозе расстроен таким образом, чтобы оперативный ток через него отставал от напряжения на угол

$$\varphi_{з.к.} = \frac{\pi}{2} - \varphi_k.$$

Тогда при любом количестве электровозов на защищаемом участке сигнал на выходе векторомерного измерительного устройства отсутствует, так как

$$U_{э.у.} = K_{э.у.} \cos(\dot{U}K_{\Sigma}) = 0 \text{ при } \left(\dot{U}K_{\Sigma}\right) = \frac{\pi}{2},$$

где $K_{э.у.}$ – коэффициент пропорциональности; I_{Σ} – суммарный ток электровозов, приведенный к месту установки измерительного блока защиты.

Влияние входного сопротивления контактной сети компенсируется при настройке защиты

$$\underline{Z}_{ex} = \underline{Z}_e \operatorname{cth}(\gamma l),$$

где Z_e – волновое сопротивление контактной сети.

Любые колебания входного сопротивления контактной сети изменяют уставку срабатывания защиты. При медленном изменении собственной проводимости контактной сети расстройка средств защитного отключения может быть снижена до требуемых пределов при помощи инерционной автоматической компенсации, основанной на подключении параллельно входным зажимам контактной сети управляемой индуктивности и активного сопротивления и изменении параметров этих элементов в процессе эксплуатации защиты таким образом, чтобы

$$Y_{ex} + Y_k = const,$$

где Y_k – комплексная проводимость двухполюсника, подключаемого параллельно входным зажимам контактной сети.

Система автокомпенсации должна быть достаточно инерционной, чтобы не повлиять на достоверность контроля внезапно возникших утечек:

$$\tau_{ак.} \gg 0,2 \text{ с.}$$

Перемещение вдоль контактной сети электровоза, оборудованного заградителем с конечным значением сопротивления оперативному току, также вызывает изменения \underline{Z}_{ex} в соответствии с формулой

$$\underline{Z}_{ex} = \underline{Z}_g \frac{\underline{Z}_2 \operatorname{ch} \gamma y + \underline{Z}_g \operatorname{Sh} \gamma y}{\underline{Z}_g \operatorname{ch} \gamma y + \underline{Z}_2 \operatorname{Sh} \gamma y},$$

где

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_k \underline{Z}_g \operatorname{cth} \gamma - y}{\underline{Z}_k + \underline{Z}_g \operatorname{cth} \gamma};$$

$$y = l_{3.0} - X,$$

здесь $l_{3.0}$ – длина защищаемого ответвления; X – удаление электровоза от тяговой подстанции.

В результате на выходе векторомерного измерительного устройства появляется сигнал расстройки, величина и знак которого зависят от параметров заградительного контура, частоты оперативного напряжения и координаты электровоза.

При отходах токоприемника от контактного провода появляются сигналы расстройки, которые воспринимаются как внезапно возникшие утечки. Они могут (в зависимости от знака и величины) вызвать ложные срабатывания защиты или изменение ее чувствительности. Расстройка измерительного устройства тем больше, чем меньше сопротивление электровозного заградителя и больше электрическая длина защищаемого ответвления контактной сети. Поэтому для эффективного функционирования средств защитного отключения, реализующих этот метод, необходимо либо значительно увеличивать габариты заградителей, либо секционировать контактную сеть на участки длиной не более 0,5 – 1 км, что в значительной мере усложняет и удорожает эксплуатацию электровозного транспорта.

Несколько лучшие результаты этого метода получены при применении принципа двухканальности. Для этого, помимо первого канала контроля сети, аналогично РУКС-4 вводится второй на близко расположенной частоте [1]. Выходные сигналы обоих каналов суммируются, а второй канал организуется так, что сигнал расстройки имеет для него знак, противоположный знаку сигнала расстройки для первого канала. При этом результирующая расстройка существенно (примерно на порядок) уменьшается.

Для эффективной компенсации сигнала расстройки измерительная схема должна иметь по каналам контроля одинаковые коэффициенты чувствительности к активной проводимости и одинаковые по величине, но противоположные по знаку коэффициенты чувствительности к реактивной проводимости. Необходимость индивидуальных подстроек по каналам контроля создает значительные трудности при практическом воплощении принципа двухканальности в защите и является существенным недостатком устройства защиты.

Слабым звеном защиты продолжает оставаться электровозный заградитель. Необходимость обеспечения его высокого сопротивления по оперативному току при ограниченном расходе меди обуславливает и его высокую добротность. Это положительное качество является одновременно и недостатком, так как при нагревании дросселя тяговым током изменяется магнитная проницаемость сердечника, а, следовательно, и индуктивность катушки. При этом изменяется частота настройки, что нарушает симметрию каналов измерительного устройства, являющуюся непременным условием нормального функционирования защиты.

Третьей разновидностью метода частотного зондирования является нейтрализация влияния электровозов на работу средств защитного отключения с помощью потенциальных или активных заградителей, принцип действия которых основан на том, что в цепи, содержащей две равные, но противоположно направленные ЭДС, тока нет. В Национальном горном университете (г. Днепропетровск) под руководством профессора В.А. Бунько было разработано несколько вариантов защиты от поражения электрическим током в шахтных контактных сетях, реализующей частотное разделение каналов рабочего и оперативного токов при потенциальном заграждении силовых цепей электровозов. Измерительные устройства этих защит реагируют на активную составляющую тока утечки

$$U_{u.y} = kI_{ym} \cos \varphi,$$

что делает измерительную информацию более достоверной, так как активная составляющая проводимости утечки лучше, чем полная коррелирует с проводимостью по постоянному току. Кроме того, применение активных заградителей позволяет снизить частоту оперативного напряжения, что расширяет радиус действия защиты. Последнее обусловлено тем, что контактная сеть, как система с распределенными параметрами, влияет на эксплуатационные характеристики средств защитного отключения.

В качестве заградителя на электровозе в цепь тяговых двигателей вводится источник дополнительной ЭДС. Для того, чтобы заграждающая ЭДС в любой момент времени была в противофазе с оперативным напряжением и равна ей по величине и частоте, источником ЭДС является электронный усилитель. Напряжение на вход усилителя подается от контактной сети через разделительный конденсатор. Эквивалентное сопротивление входа усилителя значительно

по сравнению с уставкой срабатывания аппаратуры и поэтому его можно не учитывать.

Требования к стабильности усилителя настолько высоки, что известные способы не позволяют обеспечить требуемое качество заградителя. Поэтому для стабилизации параметров заградителя необходимы специальные схемные решения, усложняющие заградитель и снижающие его надежность.

В настоящее время с учетом развития электронной техники проработаны вопросы схемотехники основных функциональных узлов частотной защиты с активными заградителями на основе микроэлектронных и микропроцессорных устройств. Такие заградители позволяют вырабатывать заграждающее напряжение, основываясь на прогнозировании требуемых значений его параметров.

Неисследованным остается вопрос устойчивого ведения активного заградителя оперативным напряжением при перемещении электровоза вдоль контактной сети. Иными словами, устойчивость системы частотной защиты с микропроцессорными активными заградителями, перемещающимися вдоль контактной сети, не является бесспорной. На определенных частотах система может самовозбуждаться.

Сказанное подтверждается результатами исследований И.М. Зальцера по устойчивости вычислительных структур [3]. Таким образом, вопрос анализа и обеспечения устойчивости активных заградителей окончательно не решен, что затрудняет их использование в системах частотной защиты.

Список литературы

1. Колосюк В.П., Трач А.И. Электроснабжение шахтных контактных электровозов: Справочное пособие. – М.: Недра, 1992. – 256 с.
2. Свиридов В.В. Расчет параметров шахтных высокочастотных заградителей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук – Новочеркасск, 1984. – 18 с.
3. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. – М.: Физматгиз, 1960. – 390 с.