

Применение устройств защиты от токов утечки

Для обеспечения надежной работы электрических сетей, питающих регулируемые установки, построенные на базе силовой электроники, используют инновационные устройства защиты от токов утечки. При выборе типа таких устройств исходят из результатов анализа сети и параметров питаемых ею электронных систем.

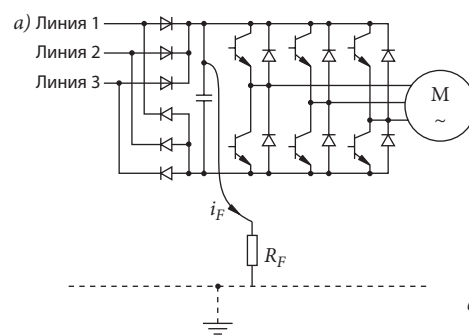
В связи с широким использованием регулируемых устройств силовой электроники разрабатываются системы нового поколения, защищающие оборудование и персонал от токов утечки. Выбор таких систем предусматривается уже на стадии проектирования силовых устройств. Различные неисправности, вызывающие возникновение токов утечки, могут быть рассмотрены на примере системы электронного регулирования привода (рис. 1), разновидности которого применяются в тяговых цепях железнодорожного подвижного состава, а также в приводе его вспомогательных устройств.

Многофазные силовые электронные устройства типа преобразователей частоты или инверторов при наличии дефектов изоляции могут быть источником утечки постоянного тока. В рассматриваемом случае постоянный ток, ответвляющийся в землю с выхода трехфазного мостового выпрямителя, не может быть обнаружен существующими устройствами защиты (RCD) типов А или АС, так как в их суммирующем трансформаторе тока не происходит изменения во времени намагничивания сердечника. Такое намагничивание было бы необходимо для индукционной передачи энергии на выходное реле устройства RCD.

Чем больше постоянный ток утечки, тем выше становится порог срабатывания RCD по переменному току, который в данном случае также присутствует в виде гармоник (см. рис. 1, б). В неблагоприятном случае устройства защиты типов А или АС вообще не сработают. В этой ситуации следует применять RCD типа В.

Устройство защиты типа АС реагирует только на токи утечки переменного тока частотой 50 Гц и поэтому в Германии не применяется. RCD типа А защищает от утечек переменного тока и пульсирующих переменных токов (гармоник) питающей сети с частотой 50 Гц.

RCD типа В реагирует на сетевые гармоники, сглаженный постоянный ток и переменные токи всех частот вплоть до 1 МГц. Эти устройства в наибольшей степени пригодны для защиты сетей, питающих схемы силовой электроники.



Разница между токами утечки и наведенными токами

Токи утечки в основном имеют омический характер и возникают в результате дефектов изоляции токоведущих частей по отношению к земле, в том числе и в результате загрязнения электрического прибора или попадания в него влаги (рис. 2).

Другим примером утечки, представляющей серьезную опасность для жизни, является возникновение тока в случае прикосновения человека непосредственно к неизолированной токоведущей части.

Наведенные токи утечки (далее — наведенные токи), возникающие в ходе эксплуатации электроустановок, имеют преимущественно емкостный характер и стекают в землю, например, через конденсаторы помехоподавляющих электромагнитных ЭМВ-фильтров или же через емкость экранированных проводов большой длины (рис. 3).

Особо важное значение имеет то, что в сетях с нагрузкой, содержащей элементы силовой электроники, как токи утечки, так и наведенные токи могут содержать, помимо основной частоты 50 Гц, также и несколько других частот. Здесь по сравнению с классическими схемами, где нагрузкой являются лампы накаливания или нерегулируемые двигатели и где токи утечки и наведенные токи имеют частоту 50 Гц, нужны другие решения. Полоса частот токов утечки обоих типов, иногда называемых дифференциальными токами, в зависимости

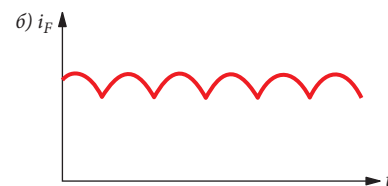


Рис. 1. Возникновение тока утечки в схеме регулируемого привода трехфазного тока: а — схема привода; б — кривая тока утечки i_F ; R_F — переходное сопротивление

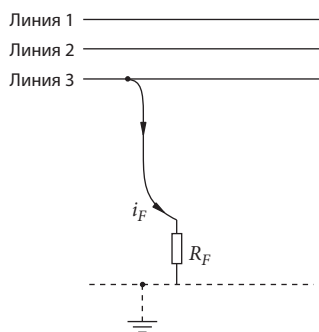


Рис. 2. Возникновение утечки переменного тока

от вида электронной схемы может иметь ширину от нескольких герц до мегагерц.

Устройства RCD не могут различать токи утечки и наведенные токи и поэтому оценивают их одинаково.

Так, срабатывание RCD может произойти, если сумма всех протекающих через него наведенных токов достигнет величины, соответствующей порогу его срабатывания. При этом повреждения в электрической установке отсутствуют.

Токи утечки в сетях с преобразователями частоты

При эксплуатации асинхронных двигателей, питаемых от преобразователя частоты, форма кривой тока утечки (и спектра его гармоник) зависит от места возникновения дефекта изоляции.

Повреждение изоляции на входе в преобразователь частоты. Если

повреждение изоляции с полным или частичным замыканием на землю произойдет на входе в преобразователь частоты, ток утечки будет чисто синусоидальным с частотой 50 Гц. При достижении этим током определенного значения срабатывает устройство RCD (рис. 4).

Дефект изоляции на конденсаторах промежуточного звена. В данном случае речь идет о замыкании положительного полюса конденсатора промежуточного звена на корпус преобразователя частоты. Это может произойти, например, в результате загрязнения изоляции или попадания влаги. В этом случае кривая постоянного тока утечки будет почти полностью сглажена. При определенной величине этого тока произойдет срабатывание RCD, причем данное устройство должно относиться к типу В (рис. 5).

Нарушение изоляции кабеля, питающего двигатель. Двигатель может получать питание током с частотой, например, 30 Гц. При этом тактовая частота преобразователя составляет 8 кГц. Ток утечки в землю, возникающий при повреждении кабеля с нарушением его изоляции, содержит большое число гармоник. Кроме основной частоты 30 Гц с малой амплитудой, кривая тока содержит тактовую частоту преобразователя 8 кГц и кратные ей гармоники 16, 24, 32 кГц и т. д. Кривая тока имеет также гармонику частотой 150 Гц небольшого уровня, генерируемую подключенным ко входу преобразователя шестипульсовым мостовым выпрямителем. Срабатывание устройства защиты RCD типа В происходит в том случае, если оно достаточно чувствительно к токам с высоким содержанием высокочастотных гармоник (рис. 6).

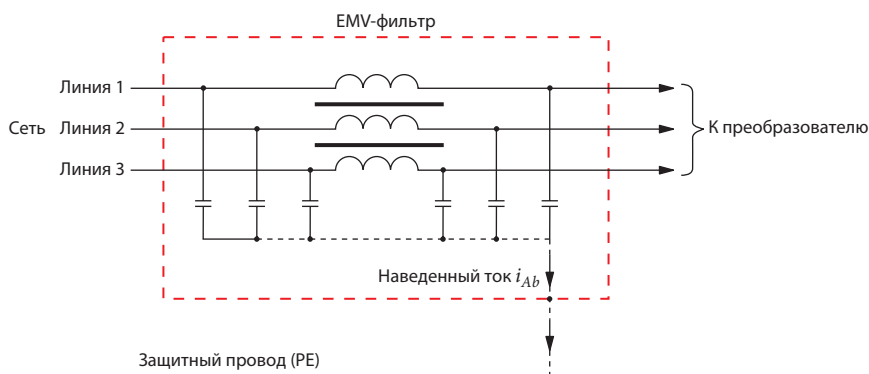


Рис. 3. Емкостный наведенный ток в схеме EMV-фильтра

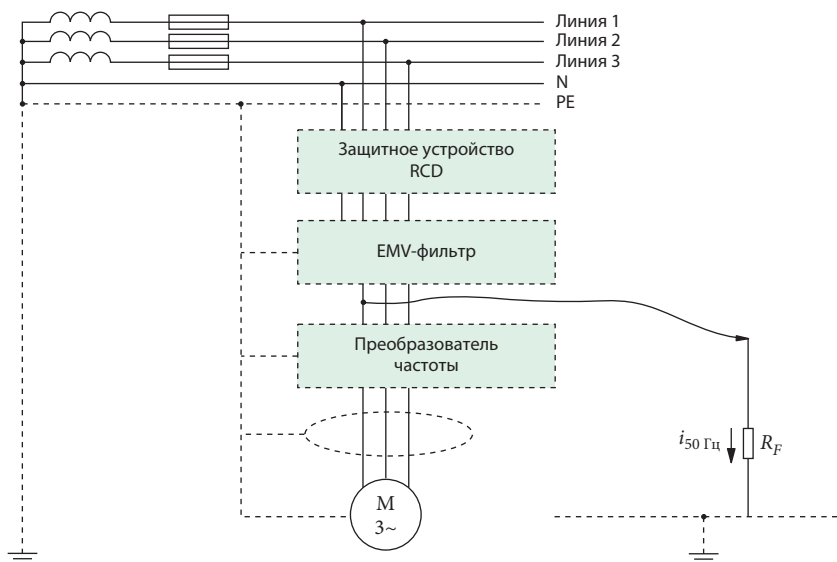


Рис. 4. Нарушение изоляции на входе преобразователя: N — нулевой провод; PE — защитный провод; $i_{50 \text{ Гц}}$ — ток утечки частотой 50 Гц

Наведенные токи

Токи этого типа подразделяются на статические, изменяющиеся и переходные. Для их рассмотрения также можно использовать

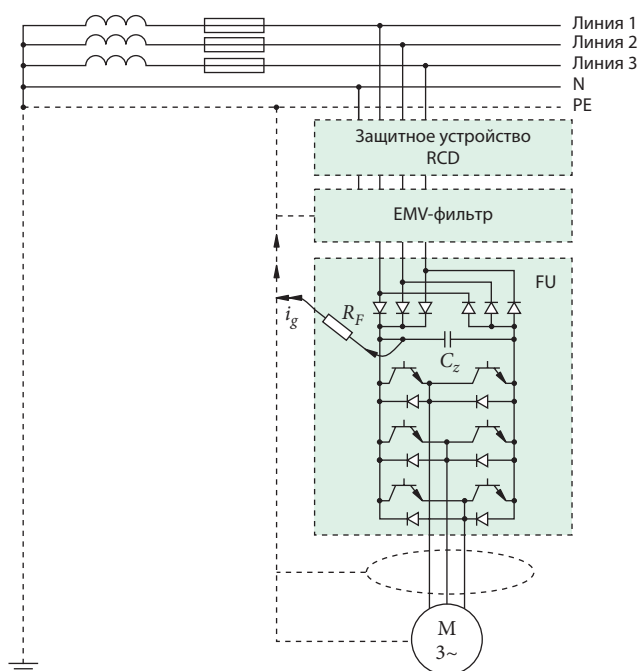


Рис. 5. Замыкание на корпус положительного полюса конденсатора промежуточного звена: i_g — сглаженный постоянный ток утечки; FU — преобразователь частоты; C_z — конденсатор промежуточного звена

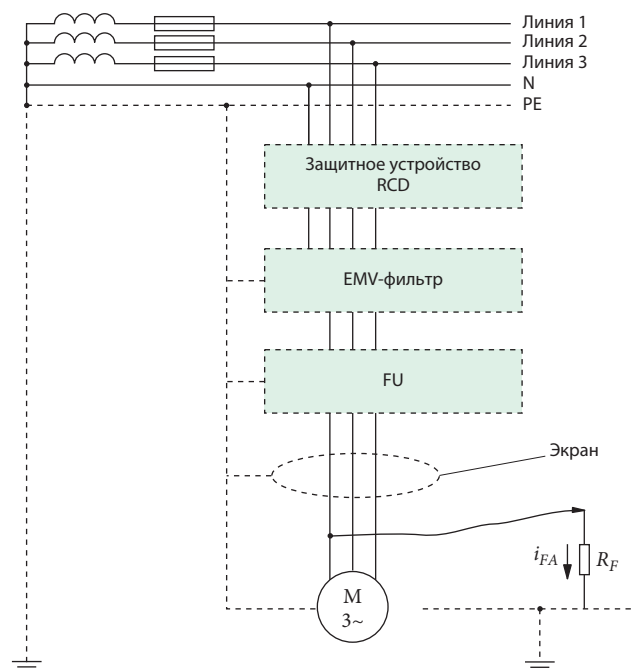


Рис. 6. Дефект изоляции, при котором ток утечки содержит много гармоник: i_{FA} — ток утечки с высоким содержанием гармоник. Остальные позиции, как на рис. 5

схему питания асинхронного двигателя от преобразователя частоты. В соответствии с требованиями инструкции по электромагнитной совместимости преобразователь рассматриваемого типа должен быть подключен через интегрированный в него EMV-фильтр. Поскольку преобразователь с широтно-импульсной модуляцией вырабатывает напряжение, кривая которого представляет собой чередование импульсов с крутым передним фронтом, это значит, что при разложении данной кривой на гармонические составляющие спектр ее будет изобиловать гармониками высокой частоты с большими уровнями. В связи с этим питающий кабель асинхронного двигателя в соответствии с требованиями EMV должен быть обязательно экранированным (см. рис. 6).

Статические или стационарные наведенные токи. Рассматриваемый в приводимых схемах EMV-фильтр в простейшем случае представляет собой низкочастотный LC-фильтр,

конденсаторы которого по схеме звезды подключены к защищаемой трехфазной линии. В идеальной сети со строго синусоидальным напряжением сумма всех емкостных токов, протекающих через конденсаторы, должна быть равна нулю. На практике же в связи с возможной асимметрией сети сумма этих токов не равна нулю. Этим обусловлено протекание по защитному проводу так называемого статического тока утечки.

Коммутационные процессы в шестипульсовом мостовом выпрямителе на входе преобразователя генерируют наведенные токи, которые протекают через внутренние конденсаторы EMV-фильтра. Статические наведенные токи имеют место и при неработающем двигателе (блокирование схемы регулирования преобразователя). Типичными для этого режима частотами являются все гармоники от 100 Гц до 1 кГц, а также составляющие спектра, лежащие в диапазоне резонансной частоты EMV-фильтра (от 2 до

4 кГц). Простые и недорогие EMV-фильтры с малой индуктивностью и большой емкостью обуславливают возникновение значительных наведенных токов, способных даже вызвать непредусмотренное срабатывание защитного устройства RCD.

Применение однофазного преобразователя частоты. Предприятия, изготавливающие однофазные преобразователи частоты, нередко укомплектовывают их интегрированными EMV-фильтрами, в схеме которых конденсаторы подключены между фазовым и защитным проводами, а также между защитным проводом и нулевым. Благодаря этому здесь не возникают наведенные токи частотой 50 Гц. При эксплуатации в сети нескольких преобразователей частоты следует обратить внимание на то, чтобы во избежание возникновения больших наведенных токов преобразователи подключались к разным фазам как можно более равномерно, т. е. чтобы нагрузка на сеть была по возможности симметричной.

За счет этого, как правило, удается избежать излишних срабатываний защитных устройств RCD.

Изменяющиеся наведенные токи.

Если частота вращения асинхронного двигателя регулируется с помощью преобразователя частоты, в общем наведенном токе появляются другие гармонические составляющие, частота которых превышает 1 кГц. Тактовые частоты преобразователя (обычно 2, 4, 8 и 16 кГц) и их гармоники создают в спектре наведенного тока составляющие с особо большими амплитудами. Кабель большой длины между преобразователем и двигателем, помещенный в заземленный экран, действует как конденсатор, соединенный одним концом с землей. Он отводит в землю токи соответствующих частот и их гармоники. EMV-фильтр под действием тактовых частот преобразователя может возбуждаться, генерируя значительные наведенные токи с частотой, близкой к резонансной.

При низких выходных частотах преобразователь может работать с пониженной тактовой частотой. Это происходит из-за изменения способа модуляции и характерно для режима, при котором выходная частота преобразователя лежит в диапазоне от 20 до 30 Гц.

Если в преобразователе используется очень высокая тактовая частота, например 16 кГц, то при последующем ее уменьшении до значения, равного или превышающего резонансную частоту EMV-фильтра, в неблагоприятных случаях резко возрастает наведенный ток. В этой ситуации вновь увеличивается вероятность нежелательного срабатывания устройства защиты RCD.

Статические и изменяющиеся наведенные токи почти всегда возникают при постоянной частоте вращения двигателя. RCD реагирует на них, вызывая отключения, если их амплитуда при определенной частоте превышает порог срабатывания. Колебания частоты

вращения также вызывают изменение наведенного тока как по амплитуде, так и по частотному спектру и могут вызвать срабатывание RCD.

Переходные наведенные токи.

При процессах отключения в сети возникают пики напряжения, вызываемые наличием индуктивности в силовой цепи. Этими пиками, имеющими большую крутизну переднего фронта, генерируются гармоники широкого высокочастотного спектра. При включениях в связи с режимом подъема напряжения также могут возникать высокочастотные составляющие, спектр и амплитуды которых зависят от фазового угла момента включения. Возникающие при этом переходные наведенные токи отводятся в землю через EMV-конденсаторы и при этом также способны вызвать нежелательное срабатывание RCD.

При включении напряжения выключателем, не оборудованным устройством скачкообразного замыкания и размыкания контактов, соединение трех фазовых проводов сети и нагрузки может происходить не синхронно, а со сдвигом во времени. В этом случае из-за кратковременного неполнофазного режима возникают большие наведенные токи, которые через конденсаторы EMV-фильтра стекают в землю. Данные переходные токи также могут вызвать срабатывание защиты RCD, однако этого можно избежать, если применять защитные устройства RCD с замедлением отключения. Для того чтобы эффективность защитного действия RCD снижалась незначительно, величина замедления должна быть невелика.

Отсюда следует, что и по отношению к переходным наведенным токам защитные устройства RCD не всегда оказываются эффективными. RCD типа В допускают повышенное замедление выключения. Если же длительность протекания переходного наведенного тока превышает предписываемые инструкциями допустимые значения

длительности срабатывания RCD, устройство все равно срабатывает в соответствии с его уставкой по амплитуде и времени.

Снижение наведенных токов

Как было показано, доработка устройств RCD с целью предотвращения ложных срабатываний, вызываемых действием наведенных токов, во многих случаях приводит к ухудшению их защитных свойств. В связи с этим рекомендуется с помощью ряда мер снижать величину наведенных токов. Так, в соответствии со стандартом DIN VDE 0100 – 530 электрические установки должны иметь такие характеристики, при которых наведенный ток не превышает величины, составляющей 40% уставки RCD по току утечки.

При использовании RCD типа В следует обращать внимание на то, чтобы указанное условие соблюдалось не только при частоте сети 50 Гц, но и во всем частотном диапазоне, на который рассчитано это защитное устройство.

Снижение статических наведенных токов. Многие изготовители статических преобразователей частоты предлагают также EMV-фильтры, конструкция и схема которых обеспечивают пониженные наведенные токи. Поставщиками преобразователей также учтены соображения о необходимости значительного уменьшения длины экранированного кабеля, соединяющего преобразователь с двигателем.

В электрических сетях с нулевым проводом можно использовать четырехпроводные фильтры. Фильтр этого типа обеспечивает пониженную величину наведенного тока, так как основная его часть отводится через нейтраль.

Проводятся также другие мероприятия, направленные на снижение негативного влияния нагрузки на сеть, создающего возникновение асимметрии.

Недопустимо подключать к одной из фаз на выходе трехфазного EMV-фильтра без нулевого провода однофазную нагрузку, второй провод которой подключается к нейтрали. В связи с несимметричным нагружением фильтра возрастают наведенные токи, и эффективность фильтра снижается. В результате затрудняется выполнение требований в отношении электромагнитной совместимости.

Если эксплуатируется несколько однофазных статических преобразователей, то для компенсации наведенных токов следует обеспечивать симметричность подключения этих преобразователей к фазам сети.

Снижение изменяющихся наведенных токов. Универсальной мерой является уже упоминавшееся уменьшение до минимума длины экранированного кабеля питания двигателя.

Необходимо применять обычные и синусные EMV-фильтры, а также фильтры, гасящие коммутационные пики напряжения (dU/dt -фильтр), или дроссели, подключаемые на выходе преобразователя перед кабелем питания двигателя. За счет снижения крутизны переднего фронта выходного напряжения преобразователя уменьшаются наведенные токи частотой более 1 кГц в кабеле питания двигателя. Особо эффективным в этом отношении является dU/dt -фильтр.

Если в сети эксплуатируется несколько преобразователей частоты, каждый из которых снабжен встроенным EMV-фильтром, то изменяющиеся наведенные токи в этом случае можно значительно снизить, дополнительно подключив общий четырехпроводный фильтр.

Другие возможности снижения статических и изменяемых наведенных токов:

- сетевые дроссели, которые использовались еще до появления EMV-фильтров, в значительной степени подавляют высшие

гармоники в кривой тока и таким образом повышают срок службы компонентов преобразователей частоты;

- в электрических сетях с несколькими преобразователями частоты следует вместо EMV-фильтров, интегрированных в каждый из преобразователей, применять один общий собирающий фильтр. Его наведенный ток значительно ниже, чем сумма токов отдельных EMV-фильтров. При этом также необходимо уделять внимание длине соединительных экранированных кабелей, питающих регулируемые двигатели;

- если в электрической сети эксплуатируется несколько преобразователей, следует следить за тем, чтобы они одновременно не работали в режиме максимальной нагрузки. При таком режиме кратковременно возникают большие суммарные наведенные токи, которые могут вызвать нежелательное срабатывание устройства защиты RCD.

Рассмотренные виды фильтров по запросу заказчика дополнительно поставляются изготовителями преобразователей частоты, инверторов и других устройств силовой электроники. При этом уточняются параметры фильтров и оговариваются технические детали. Для того чтобы выполнялись требования стандартов в области электромагнитной совместимости, нередко с целью снижения наведенных токов производится замена EMV-фильтров после проведения соответствующих измерений.

Снижение переходных наведенных токов. В сетях с электронными силовыми установками при включении и отключении возникают переходные наведенные токи. Как уже отмечалось, применяемые EMV-фильтры содержат в своей схеме конденсаторы, которые соединены звездой и нулевой точкой подсоединены к земле. Существующие коммутирующие устройства в сетях имеют разную величину

времени срабатывания, которая колеблется в пределах от 10 до 40 мс. В течение этого промежутка времени в схеме конденсаторов, соединенных звездой, нарушается симметричность нагрузок. В результате возникает большой разностный емкостный ток (см. рис. 3), протекающий по защитному проводу PE и вызывающий ложное срабатывание защитного устройства RCD. В этом случае требуется применение быстродействующих коммутирующих устройств, например контакторов мгновенного включения и выключения под действием пружины.

В электроустановках с большим сетевым импедансом или значительной асимметрией напряжения в некоторых случаях, в частности при наличии большого числа преобразователей с интегрированными EMV-фильтрами, даже при наличии быстродействующих коммутационных аппаратов происходят ложные отключения. Они вызваны возникновением большого наведенного тока, протекающего через незаряженные конденсаторы EMV-фильтров в течение времени, которое превышает допустимое время срабатывания защитного устройства RCD. В этом случае проблема может быть решена использованием собирающего общего EMV-фильтра, значительно снижающего коммутационный наведенный ток.

Резонанс EMV-фильтров и проблема емкости подводных кабелей двигателя

Повышение наведенного тока может быть также вызвано склонностью к резонансам EMV-фильтров. Повышенная опасность нежелательного срабатывания RCD может быть обусловлена равенством или кратностью тактовой частоты преобразователя резонансной частоте EMV-фильтра. Например, если резонансная частота фильтра равна 2,1 кГц, то при тактовой

частоте преобразователя, равной 2 кГц, т.е. близкой к резонансной, уже возникнет наведенный ток довольно большой величины. Если же тактовая частота будет равна 4 кГц, то в этом случае также возможен режим, близкий к резонансу, поскольку данная частота почти кратна резонансной.

Более высокие тактовые частоты, особенно не кратные резонансной, например 7 кГц, снижают опасность резонанса фильтров и, соответственно, угрозу возникновения больших наведенных токов. Таким образом, следует выбирать более высокие тактовые частоты преобразователей и исключать возможность произвольного их снижения при низкой частоте на выходе.

Применяемые встроенные EMV-фильтры становятся неэффективными, если длина кабеля, питающего регулируемый двигатель, превышает 10 м. Все документы, регламентирующие электрические параметры установок с точки зрения электромагнитной совместимости, ориентированы на длину этого кабеля от 5 до 10 м. В то же время в эксплуатации нередко возникает необходимость увеличения этой длины до 50 и даже до 100 м. В этом случае исходят не из требований соответствия нормам EMV, а из максимально допустимой емкостной нагрузки выходной ступени преобразователя. В данном случае такой нагрузкой является экранированный кабель двигателя, имеющий большую длину. Такой кабель способствует увеличению асимметричных емкостных токов и магнитному насыщению дросселей EMV-фильтров. В результате значительно возрастает наведенный ток и может возникнуть резонанс фильтров. Насыщенный сердечник фильтрового дросселя практически выключает EMV-фильтр, т.е. делает его неэффективным.

Если возникает необходимость эксплуатации преобразователя со встроенными EMV-фильтрами и

экранированным кабелем двигателя большой длины (более 10 м), следует отключить встроенные фильтры и использовать внешний фильтр с необходимыми параметрами. Для выбора параметров нужно провести определенный комплекс электромагнитных измерений на всех элементах электрической установки.

Применение защитных устройств RCD на железных дорогах

Силовая электроника широко применяется на железнодорожном транспорте, в том числе на подвижном составе и в устройствах инфраструктуры. Различные преобразователи и инверторы используются на электронных постах централизации. Здесь также большое внимание уделяется проблеме токов утечки и наведенных токов.

Асимметрия и гармоники возникают не только в системах электропитания, но и в устройствах, где используются электрические нагреватели, в частности в системе отопления поезда. Причины асимметрии здесь следует искать не в нагрузке, которая имеет чисто омический характер, а в защитном проводе. Роль этого провода выполняют ходовые рельсы. Поскольку по рельсам протекает обратный тяговый ток, то при электронном тяговом преобразователе в кривой тока присутствуют гармоники различных частот.

На тяговом подвижном составе бортовое электропитание осуществляется в основном с помощью инверторов, выходное напряжение которых не является чисто синусоидальным и поэтому содержит много гармоник широкого частотного спектра. Эффективная защита от токов утечки может быть обеспечена лишь при использовании фильтров, параметры которых согласованы с техническими характеристиками и мощностью питающей сети.

Поскольку эти фильтры могут оказаться достаточно дорогими, существует альтернатива в виде защитного выключателя, реагирующего на токи утечки всех видов.

Несмотря на рассмотренные меры по снижению наведенных токов, нежелательные срабатывания устройств RCD все же имеют место. В таких случаях, особенно в новых установках, сдаваемых в эксплуатацию, необходимо проводить анализ дифференциальных токов (утечки и наведенных). С помощью имеющихся на рынке систем анализа дифференциальных токов проводится тщательное исследование фиксируемого устройством RCD дифференциального тока с оценкой частот и амплитуд гармоник в его спектре. На основе полученных результатов делают соответствующие выводы и принимают меры по дальнейшему снижению дифференциальных токов.

Наблюдение за изменениями наведенного тока может проводиться в течение длительного времени в нескольких частотных диапазонах, что позволяет определить момент времени, в который в спектре наведенного тока появляется критическая гармоника. Особо продуктивен оценочный анализ кривой. Исследователь с помощью разных меню может выбрать одно или несколько защитных устройств типа В (например, с уставками от 30 до 500 мА для приборов семейства DF S4 Тур В и разными характеристиками срабатывания) и наблюдать степень нагружения устройства RCD мгновенными значениями тока небаланса.

Система анализа дифференциальных токов состоит из преобразователя тока небаланса и измерительного звена, которые объединены с помощью персонального компьютера или ноутбука и соответствующего программного обеспечения. С помощью такой системы могут быть измерены токи утечки или наведенные токи с уровнем до 10 А. При этом наилучшим образом

могут быть исследованы нежелательные токи небаланса, протекающие в защитном проводе. Ток утечки, фиксируемый устройством RCD, необязательно должен быть равен току небаланса, протекающему в защитном проводе.

При отсутствии исчерпывающих данных о параметрах сети, содержащей несколько точек заземления, токи небаланса определить сложно, поскольку они распределяются между несколькими защитными проводами. Таким образом, система анализа дифференциальных токов является полезным инструментом для оценки электрической установки с системами силовой электроники в отношении конформности требованиям EMV.

Выводы и рекомендации

Применение современной техники, такой, например, как устройства электроснабжения с электронным регулированием, дает не только одни преимущества. Простая замена традиционных устройств на установки силовой электроники может быть даже опасной, если не выполнить мер по согласованию их параметров с общей системой. Недостаточное знание характеристик сети может привести к неконтролируемому срабатыванию защитных устройств, что означает утрату ими их защитных функций, отсутствие реакции на нарушение изоляции, влекущее за собой возможность травмирования людей. Изменение

лишь одной установки требует согласования ее параметров с сетью. Это обстоятельство должно быть учтено еще на стадии разработки планируемого проекта изменения.

Относительно простым вариантом является применение защитного устройства, реагирующего на токи утечки всех видов и гарантирующего защиту от поражения человека электрическим током, так как оно не зависит от асимметрии питающего напряжения и пригодно для защиты от токов утечки во всех системах электроснабжения.

По материалам компаний Doepke Schaltgeräte (www.doepke.de) и Voltimum (www.voltimum.de); Eisenbahningenieur, 2010, № 10, S. 42–46; № 11, S. 34–37.

Будущее приближается

В современном мире железнодорожная отрасль не может устойчиво развиваться без международных контактов, обмена опытом и знаниями, привлечения передовых технологий и технических решений со всего мира. На наших глазах происходят фундаментальные изменения на Российских железных дорогах — мы видим современные поезда, продолжаются структурные реформы, в железнодорожную промышленность приходят новые технологии, крупнейшие компании — изготовители железнодорожной техники уже осуществляют локализацию производства в России.

Обязательным условием для успешной модернизации отечественной железнодорожной отрасли является доступ к информации о новых проектах в России и за рубежом, событиях на рынках железнодорожной техники, научных исследованиях, о новых технологиях и опыте их внедрения на железных дорогах мира.

Именно такую цель — сделать эту информацию более доступной для отечественных специалистов — ставит перед собой журнал «Железные дороги мира».

Подписной индекс ежемесячного журнала «Железные дороги мира» — 70306 (для подписки на весь год — индекс 87096).

Информацию о подписке (в том числе в странах дальнего зарубежья) можно получить по телефону +7 (499) 317-55-65 или на сайте www.zdmira.ru.



**ЖЕЛЕЗНЫЕ
ДОРОГИ
МИРА**

