

Технологии и компоненты для защиты микропроцессорных реле от электромагнитного импульса

Владимир ГУРЕВИЧ,
к. т. н.

Проблемы защиты микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) от воздействия мощного электромагнитного импульса, способного нарушить их нормальное действие или повредить внутренние элементы, приобрели в последнее время особую актуальность. В данной статье рассматривается комплекс вопросов, связанных с влиянием электромагнитного импульса на МУРЗ, и предложены технологии и компоненты, с использованием которых может быть существенно повышена устойчивость МУРЗ к электромагнитному импульсу.

Введение

Современные тенденции развития релейной защиты (РЗ), связанные с заменой электромеханических реле защиты микропроцессорными устройствами релейной защиты (МУРЗ), обусловили появление совершенно новой проблемы, не известной ранее в релейной защите. Такой проблемой является возможность преднамеренного дистанционного деструктивного воздействия (ПДДВ) на релейную защиту с целью выведения ее из строя или принудительного выполнения операций, не связанных с текущим режимом работы защищаемого электрооборудования. В структуре современной энергосистемы МУРЗ остаются самым критичным звеном, которое, с одной стороны, наиболее уязвимо к ПДДВ, а с другой — непосредственно связано с силовыми коммутационными аппаратами, влияющими на состояние энергосистемы. Поэтому именно на МУРЗ в первую очередь и направлены ПДДВ в виде кибератак и преднамеренных электромагнитных деструктивных воздействий. Наиболее мощным и опасным из этих воздействий является электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) [1], рассмотрению мер защиты от воздействия которого на МУРЗ посвящена данная статья.

Проблема заземления МУРЗ

На объектах электроэнергетики (подстанциях и электростанциях), имеющих значительную территорию, невозможно реализовать многие известные методы эффективного заземления, ввиду неизбежности заземления различных электроустановок, расположенных на большом удалении друг от друга, в различных точках общего контура. Причем данные точки заземления приобретают значительную разность потенциалов в момент протекания больших импульсных токов через контур заземления. Если электроустановки не имеют между собой гальванической связи, такой, например, как реле защиты, соединенные между собой волоконно-оптическими линиями (ВОЛС), то разность потенциалов особой роли не играет. Но если реле защиты, расположенные на удалении друг от друга, соединены между собой проводной системой связи (витой парой и обычным Ethernet-каналом, на который в последнее время переходят для удешевления систем электроснабжения), то к низковольтным узлам этой системы будет приложено высокое напряжение,

неизбежно приводящее к ее повреждению, то есть к отказу релейной защиты (рис. 1).

Известны технические решения по организации заземления высокочувствительной электронной аппаратуры с целью защиты ее от влияния разности потенциалов при протекании токов молнии или больших токов короткого замыкания через элементы системы заземления. Такие решения включают, например, соединение корпусов нескольких взаимосвязанных объектов в общую точку (на общую шину) и последующее соединение этой общей точки (шины) с общей системой заземления подстанции, электростанции. При использовании подобного решения предполагается отсутствие разности потенциалов между взаимосвязанными электроустановками благодаря тому, что все их точки соединения объединены в общей точке или на одной короткой шине. Аналогичными свойствами обладает и объединение точек заземления отдельных электроустановок на общей эквипотенциальной плоскости, в качестве которой используются элементы конструкций металлических шкафов, в которых расположены эти электроустановки (рис. 2).

Рядом стоящие шкафы присоединяют к общей шине заземления, которая, в свою очередь, уже соединяется с системой заземления. Такие решения возможны в том случае, когда гальванически связанные электроустановки (МУРЗ) расположены на небольшом расстоянии друг от друга, например, внутри одного шкафа, а шкафы —

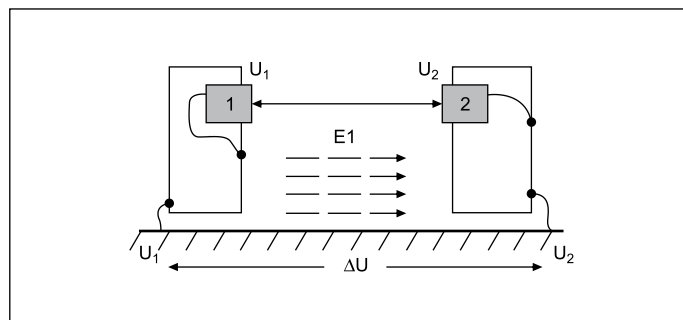


Рис. 1. Схема подключения двух МУРЗ (1 и 2), расположенных на значительном расстоянии друг от друга, с неизолированным каналом связи (витая пара и сеть Ethernet)



Рис. 2. Устройство заземления МУРЗ, установленных в металлических шкафах, с использованием эквипотенциальной поверхности:
 1 — МУРЗ в металлических корпусах;
 2 — заземляющие медные шинки;
 3 — элемент конструкции металлического шкафа, исполняющего роль эквипотенциальной поверхности

в пределах одного релейного зала. Если же электроустановки, имеющие между собой гальваническую связь, находятся в различных местах на большой территории, такое решение неприменимо.

Как известно, существует два вида заземления: так называемое функциональное (или рабочее) и защитное. Как следует из названий этих видов заземления, первое предназначено лишь для обеспечения нормального функционирования (работы) оборудования (ПУЭ 1.7.30), а второе — исключительно для обеспечения электробезопасности персонала (ПУЭ 1.7.29). В [2] утверждается, что функциональное заземление необходимо для обеспечения работоспособности МУРЗ, и рассматриваются различные варианты выполнения такого заземления и методы его испытания. Действительно, на некоторых печатных платах МУРЗ имеются зачищен-

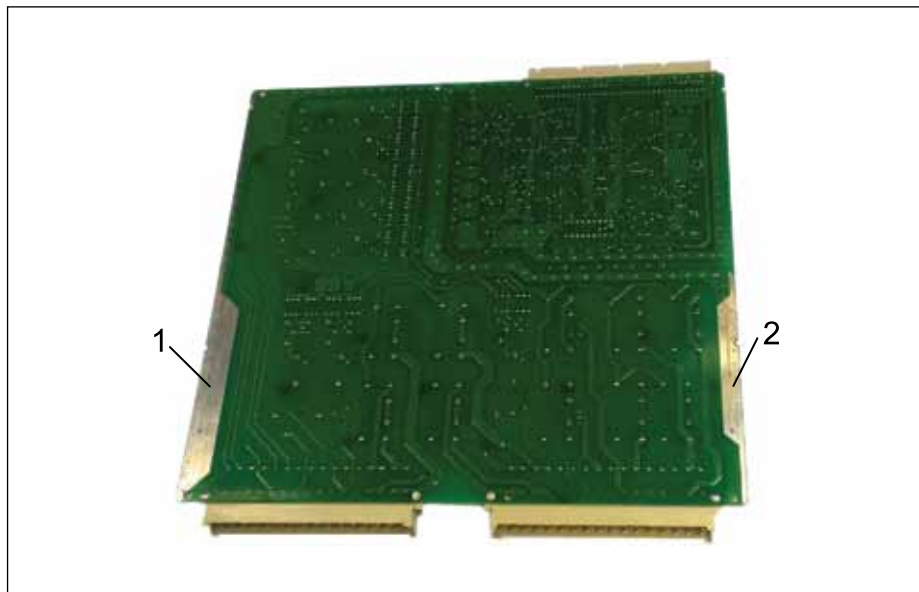


Рис. 3. Печатная плата МУРЗ с зачищенными участками печатного монтажа (1 и 2), контактирующими с заземленным корпусом посредством специальной пружины

ные и покрытые слоем серебра участки печатных проводников увеличенной ширины, которые при установке платы в корпусе приходят в соприкосновение со специальными пружинами, обеспечивающими контакт этих печатных проводников с заземленным корпусом МУРЗ (рис. 3).

Но действительно ли функциональное заземление необходимо для нормальной работы МУРЗ, чьи входные и выходные цепи хорошо изолированы от «земли» и от других электроустановок (при использовании ВОЛС для связи между терминалами)? Ведь работоспособность внутренних электронных цепей МУРЗ никак не связана с наличием или отсутствием заземления. Что же касается эффективности защиты чувствительных электронных цепей МУРЗ от воздействия внешних электромагнитных полей с помощью металлического корпуса, призванного выполнять роль так называемой клетки Фарадея, то эта эффективность никак не зависит от наличия или отсутствия заземления. То есть заземление корпуса МУРЗ никоим образом не влияет на экранирующий эффект корпуса. С другой стороны, если сигналы по мех поступают по кабелям на электронные цепи МУРЗ, расположенные внутри корпуса, то как заземление его корпуса предотвратит воздействие этих помех (особенно помех дифференциального типа)? Ответ очевиден: никак! Более того, можно утверждать, что заземление корпусов МУРЗ лишь усугубляет ситуацию и снижает помехоустойчивость релейной защиты. Так, в соответствии со стандартом ИЕС 60255-22-4 импульсным напряжением наносекундного диапазона с амплитудой 4 кВ проверяются все входные и выходные цепи реле защиты, за исключением портов цифровой связи. То есть заранее предполагается, что эти порты и цепи

не выдержат подобных испытаний. Но при использовании обычной витой пары и присоединения этих цепей к сети Ethernet вместо использования ВОЛС, к цепям неизбежно будет приложено высокое напряжение в случае, изображенном на рис. 1. А как изменится ситуация, если корпуса МУРЗ будут тщательно изолированы от системы заземления? Если пренебречь паразитными емкостями (а в рассмотренном ниже варианте конструктивного исполнения ими действительно можно будет пренебречь), то исходя из того же рис. 1 к портам цифровой связи высокое напряжение приложено не будет.

Еще одна проблема принятой сегодня системы заземления — электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ), в частности, его так называемая «быстрая» составляющая — E1, которая характеризуется коротким, но очень мощным импульсом электрического поля у поверхности Земли, напряженностью до 50 кВ/м с передним фронтом около нескольких наносекунд и задним фронтом около одной микросекунды [3]. Это поле имеет сложную структуру и содержит вертикальную и горизонтальную составляющие, обуславливающие появление значительных импульсов тока в протяженных проводниках, в том числе в системах заземления, выполняющих роль больших антенн, поглощающих электромагнитную энергию на значительной площади. В случае разряда молнии или пробоя изоляции высоковольтного электрооборудования, имеющего функционально заземленные части (например, заземленные нулевые точки обмоток высоковольтных трансформаторов, соединенных в «звезду»), система заземления играет роль электрода, имеющего нулевой потенциал. В большинстве нормативных документов, даже таких серьезных, как [3], не делается

никакой разницы между воздействием на систему заземления разряда молнии и компонента Е1 ЭМИ ЯВ. Например, в документе [3] дословно записано следующее: «Так как влияние наведенной электромагнитным импульсом помехи подобно той, что наблюдается при разрядах молнии, система молниезащиты и система заземляющих электродов — главные интерфейсы системы защиты от электромагнитного импульса».

Однако на самом деле есть существенная разница между высоковольтным разрядом молнии на систему заземления с нулевым потенциалом или пробоем изоляции высоковольтного оборудования на «землю» и импульсом Е1 мощного электрического поля, часть которого направлена параллельно поверхности земли, то есть параллельно сетке системы заземления. При возникновении ЭМИ ЯВ система заземления уже перестает быть поверхностью с нулевым потенциалом и начинает играть роль источника высокого импульсного напряжения, прикладываемого к электрооборудованию, заземленному в различных частях системы заземления и имеющему гальваническую связь между своими элементами (рис. 1). Поскольку речь идет об очень мощном и очень коротком, обладающем высокочастотными свойствами импульсе, создающем в воздухе напряженность поля, достигающую 50 кВ/м, то становится понятным, что даже на небольшом участке стандартной системы заземления может появиться очень высокая разность потенциалов, намного превышающая значение, возникающее при протекании токов молнии через систему заземления. Поэтому требования к электрической прочности изоляции входных и выходных цепей МУРЗ выдерживать испытательные импульсные напряжения наносекундного диапазона с амплитудой 4 кВ, указанные в стандарте IEC 60255-22-4, уже явно недостаточны для обеспечения работоспособности МУРЗ. Кроме того, мы неспроста упомянули о корпусе МУРЗ как об элементе, «призванном выполнять роль клетки Фарадея, а не «выполняющего роль клетки Фарадея». Потому что на самом деле металлические корпуса современных МУРЗ довольно плохо справляются с ролью клетки Фарадея из-за наличия в них больших вырезов для экранов, кнопочных панелей, клеммных колодок (рис. 4).

Параметры составляющей Е1 ЭМИ ЯВ таковы, что все эти вырезы в металлическом корпусе обуславливают проникновение мощной электромагнитной волны с эквивалентной частотой, доходящей до десятков гигагерц, внутрь корпуса МУРЗ.

Стандартные металлические шкафы, в которых сегодня размещаются комплекты устройств релейной защиты, также мало пригодны для того, чтобы предохранить МУРЗ от высокочастотных электромагнитных полей, поскольку имеют полностью открытую нижнюю (или верхнюю) часть для ввода



Рис. 4. Современные терминалы МУРЗ в корпусах с многочисленными окнами, вырезами и отверстиями под экраны, кнопки, индикаторные панели и другие элементы



Рис. 5. Терминалы МУРЗ, установленные в стандартных шкафах со стеклянными дверями

многочисленных кабелей, а иногда и стеклянные двери, через которые удобно наблюдать за экранами и индикаторами МУРЗ, не открывая их (рис. 5). Поэтому так или иначе необходимо искать альтернативные решения для обеспечения подобной защиты.

Таким образом, становится очевидным, что действительно необходимо лишь защитное заземление корпусов МУРЗ, предохраняющее персонал от поражения электрическим током при прикосновении к корпусу МУРЗ, но никак не функциональное заземление.

Что касается защиты от воздействия компонента Е1 ЭМИ ЯВ, оказывается, что известные технические решения по системам заземления, применяемые в электроэнергетике, являются не просто бесполезными из-за высокого сопротивления на эквивалентной частоте в десятки гигагерц, но и опасными для чувствительной электронной аппаратуры. В связи с чем можно констатировать, что требование заземления корпусов микропроцессорных устройств релейной защиты приходит в противоречие с требованием

обеспечения их устойчивости к воздействию ЭМИ ЯВ. Однако, поскольку речь идет лишь о защитном, а не о функциональном заземлении, очевидно, что существуют и другие возможности для обеспечения безопасности персонала при работе с МУРЗ, кроме заземления их корпусов.

Решение проблемы заземления и других смежных проблем

По нашему мнению, решить проблему можно, выполнив терминал МУРЗ в тщательно изолированном (пластмассовом) корпусе и приняв дополнительные меры по предотвращению выноса опасного потенциала на поверхность этого корпуса. Такими мерами могут быть: закрытие экрана прозрачной пластмассовой панелью; вывод управляющих кнопок на поверхность корпуса через изоляционные проставки; подвод света со светодиодов на световое табло, расположенное на поверхности корпуса, через жесткие пластмассовые световоды; использование изолированного оптического порта для подключения внешнего компьютера к МУРЗ.

Дополнительными мерами, не только обеспечивающими безопасность персонала при отсутствии заземления корпуса, но и повышающими устойчивость к воздействию высоковольтных импульсов на входные и выходные цепи МУРЗ, должны стать определенные изменения в их конструкции.

Аналоговые входы

Элементами, связывающими аналоговые входы МУРЗ с внешними цепями тока и напряжения, являются входные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН), поэтому именно такие элементы будут в первую очередь подвергнуты воздействию мощных перенапряжений ПДЦВ. Входные ТТ в МУРЗ имеют наиболее простую конструкцию. Как правило, это многовитковая вторичная обмотка, намотанная на ферромагнитном сердечнике, и первичная обмотка, состоящая из нескольких витков толстого изолирован-

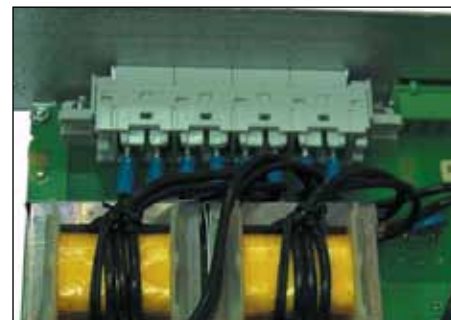


Рис. 6. Фрагмент модуля аналоговых входов МУРЗ с установленными ТТ. Хорошо видна первичная обмотка, состоящая из четырех витков гибкого изолированного провода черного цвета



Рис. 7. Трансформаторы тока капсулированной конструкции с вторичной обмоткой, заложённой в пластмассовый корпус и залитой эпоксидным компаундом, отверждённым под вакуумом. Видна первичная обмотка, состоящая из одного витка гибкого изолированного провода

ного провода, намотанного поверх изолированной вторичной обмотки (рис. 6).

Методы повышения устойчивости такой конструкции к воздействию мощных импульсных напряжений достаточно просты и заключаются в следующем:

- капсулирование вторичной обмотки путем заливки ее эпоксидным компаундом с отверждением под вакуумом (рис. 7);
- использование провода в высоковольтной изоляции для изготовления первичной обмотки;
- использование дополнительных экранов и полупроводящих покрытий, выравнивающих электрическое поле в конструкции ТТ;
- применение магнитопровода с изолированной поверхностью.

Десятки типов гибких проводов в высоковольтной изоляции из силикона, полиэтилена, фторопласта на напряжения 10–25 кВ выпускаются многими компаниями, в том числе Teledyne Reynolds, Multi-contact, Allied Wire & Cable, Wiremax, Dielectric Sciences Inc., Axon Cable, Daburn Electronics & Cable, Sumitomo Electric, Belden, ОКБ кабельной промышленности, ООО «Редкий Кабель» и многими другими.

Рекомендации по усилению устойчивости ТН аналогичны, за исключением того, что

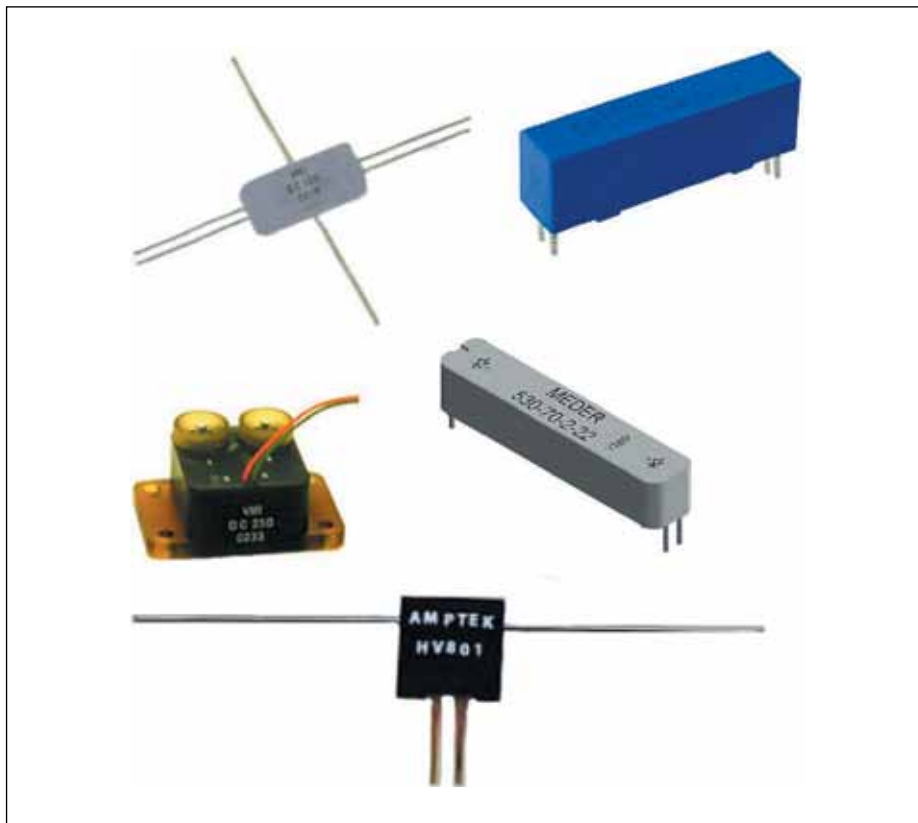


Рис. 8. Внешний вид оптронов некоторых типов с напряжением изоляции входа от выхода 12–25 кВ

вместо гибкого провода с высоковольтной изоляцией в качестве первичной обмотки применяется обмоточный провод с улучшенной изоляцией 3-го класса в соответствии с IEC 60317-0-1 Specification for particular types of winding wires — Part 0-1: General requirements — Enamelled round copper wire из полиимида (Polyimide), а также пропитка под вакуумом обоих обмоток. Поскольку увеличение сечения обмоточного провода сопровождается автоматическим увеличением толщины изоляции и ее электрической прочности, то следует стремиться к использованию большего по сечению провода, несмотря на естественное увеличение размеров ТН. Некоторые производители выпускают обмоточные провода с изоляцией из полиимида, выдерживающие полторное и даже двойное напряжение по сравнению с нормируемым по стандарту IEC 60317-0-1, например, английская компания P. A. R. Insulations & Wires Ltd, турецкая Bemka A. S. и другие.

Дискретные входы

Изоляция дискретных (логических) входов практически всех типов МУРЗ обеспечивается оптронами. Как правило, это миниатюрные оптроны в стандартных корпусах DIP-4, DIP-6, DIP-8, SOP-4. Электрическая прочность изоляции между внутренним фотоизлучающим и фотоприемным элементами у таких оптронов может достигать до 5–7 кВ действующего значения переменного тока.

Однако реально оптроны, установленные на печатной плате, такие напряжения не выдержат из-за пробоя между ножками по поверхности платы. В то же время на рынке широко представлены оптроны в специальных корпусах с разнесенными в пространстве выводами входа и выхода (рис. 8), выдерживающие напряжения между входом и выходом, достигающие до 12–25 кВ. Это оптроны типа OC100 (Voltage Multipliers, Inc.); HV801 (Amptek, Inc.); OPI1268S (TT Electronics); 5253003120 (Standex Meder Electronics) и т. д. Именно такие оптроны следует применять в дискретных входах МУРЗ для повышения их устойчивости к ЭМИ ЯВ.

Схемы МУРЗ обычно построены таким образом, что первыми элементами, к которым прикладывается поступающий на дискретные входы сигнал, являются варисторы, защищающие входы оптронов от перенапряжений. Далее следуют гасящие высокоомные резисторы, снижающие уровень входного напряжения (обычно 230 В) до рабочего напряжения входной цепи оптрона, при котором ток в этой цепи не превышает нескольких миллиампер. При использовании TVS-диодов вместо варисторов дискретные входы оказываются хорошо защищенными не только от коммутационных перенапряжений, как при использовании варисторов, но и от короткого высоковольтного импульса компонента E1 ЭМИ ЯВ, если ему удастся проникнуть на эти входы. Слишком высокое быстродействие современных оптронов, осо-

бенно на основе фотодиодов, способное достигать 10^{-9} с, является еще одной проблемой. Вот почему для повышения помехоустойчивости оптрона требуется дополнительная защита от его ложного срабатывания при воздействии короткого импульса E1. Такую защиту можно реализовать путем шунтирования входа оптрона высокочастотным керамическим конденсатором, снижающим быстродействие оптрона и, следовательно, повышающим его помехоустойчивость.

Выходные реле

Использование в МУРЗ выходных реле с повышенной прочностью электрической изоляции — одна из мер повышения устойчивости МУРЗ к воздействию ЭМИ ЯВ. Хорошие перспективы для этого есть у герконовых реле, выполненных на основе новых малогабаритных герконов большой мощности типа R14U и R15U с двойной коммутацией, которые, под торговой маркой BESTACT (рис. 9) выпускает компания Yaskawa. Герконы данного типа имеют двойной контакт (основной и дугогасительный), с последовательной коммутацией, позволяющий включать активно-индуктивную нагрузку с током 15 А при напряжении 220 В DC и 30 А при напряжении 220 В AC. На основе этих герконов компания выпускает реле различных типов — например, R1-B14T2U. Одно из отличий герконового реле от других типов электромагнитных реле — простота конструкции (геркон и катушка) и возможность доступными техническими средствами обеспечить очень высокий уровень изоляции (десятки киловольт) между катушкой и герконом. Такая возможность герконового реле очень важна при использовании его в качестве выходного реле МУРЗ, защищенного от ЭМИ ЯВ, и может быть реализована на основе готовых разработок автора, описанных в [5].

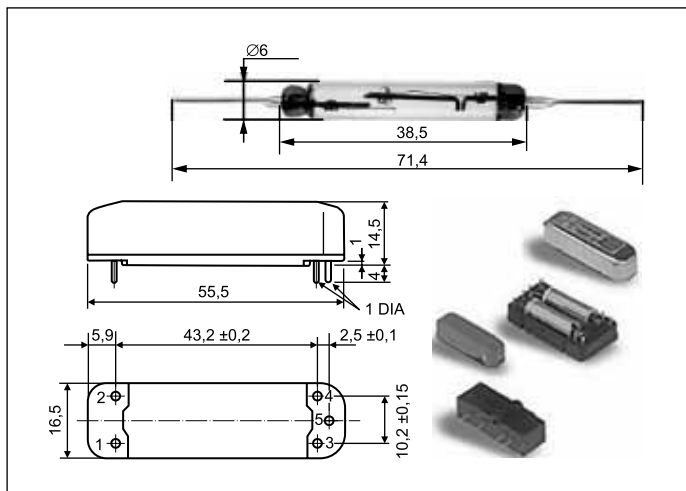


Рис. 9. Мощный геркон типа R14U (R15U) с двойным контактом и реле на его основе, производимые компанией Yaskawa

Печатные платы

Устойчивость к импульсным напряжениям современных печатных плат с элементами поверхностного монтажа зависит не только от правильного выбора электронных компонентов, но и от пробивного напряжения между ножками элементов и расстояния между печатными проводниками (которые из-за высокой плотности монтажа бывают очень маленькими). Поэтому одним из дополнительных путей повышения надежности МУРЗ в условиях воздействия ЭМИ ЯВ может быть сплошное двустороннее покрытие плат специальным высоковольтным лаком. Примером такого лака могут быть продукты, выпускаемые компанией Vol Roll под торговой маркой Damicoat, типов 2405-01, 2407-01 и других. Эти лаки имеют электрическую прочность изоляции 70–100 кВ/мм. Поскольку печатные платы с таким покрытием становятся полностью неремонтопригодными, от-

сюда вытекает дополнительное требование к конструкции МУРЗ: количество печатных плат, из которых состоит МУРЗ, должно быть увеличено, чтобы при выходе из строя одного функционального модуля заменять именно этот модуль, а не группу функциональных модулей, расположенных на общей печатной плате. Для этого количество печатных плат, из которых состоит МУРЗ, должно быть увеличено до количества функциональных модулей. То есть каждый функциональный модуль (источник питания, модули дискретных входов, модули аналоговых входов, модуль центрального процессора, модуль выходных реле) должен быть выполнен на отдельной выдвигной печатной плате, соединяемой с другими платами через кросс-плату.

Такой подход не только необходим в связи с неремонтопригодностью отдельных модулей МУРЗ, но и весьма желателен с точки зрения решения проблемы стандартизации конструкции МУРЗ и унификации его модулей [4].

Еще одно преимущество конструкции МУРЗ, содержащей отдельные неремонтопригодные функциональные модули, состоит в возможности использования нового (для релейной защиты) критерия оценки надежности, вместо такого, мягко выражаясь, странного критерия, как «наработка на отказ» с его фантастическими цифрами в 50–90 лет, что не имеет никакого отношения к реальной (а не фиктивной) надежности. Этот критерий называется «гамма-процентная наработка до отказа» и характеризует наработку, в течение которой отказ объекта не возникает с определенной вероятностью, выраженной в процентах. Например, 95%-ная наработка до отказа в течение не менее пяти лет означает, что за пять лет работы должно отказывать не более 5% устройств, находящихся в эксплуатации. Имея такой удобный и понятный показатель, потребитель мог бы отследить количество вышедших из строя модулей за определенный промежуток времени и предъявить производителю претензии, если в течение данного периода отказало значительно большее количество модулей, чем было гарантировано производителем. Благодаря такому показателю потребителю значительно легче ориентироваться и на будущем рынке универсальных модулей [4] и выбирать наиболее приемлемый вариант по соотношению цена/качество. К тому же следует обязать производителей указывать в технической и тендерной документации средний срок службы отдельных модулей и давать рекомендации относительно периодичности превентивной замены этих модулей, чтобы поддержать высокий уровень надежности релейной защиты. Например, для модуля источника питания это может быть 8–10 лет; для модуля логических входов — 12 лет; для модуля центрального процессора — 15 лет; для модуля аналоговых входов — 17 лет, и т. д. Эти данные должны быть известны добросовестному производителю, отслеживающему статистику отказов и повреждений своих изделий.

Фильтры ЭМИ ЯВ

Все входы и выходы МУРЗ (за исключением портов оптической цифровой связи) должны подключаться к внешним цепям через специальные фильтры, защищающие внутренние электронные цепи МУРЗ от проникновения ЭМИ ЯВ. Более десятка крупных компаний производят и широко рекламируют такие фильтры как эффективное средство защиты от проникновения ЭМИ ЯВ во внутренние электронные цепи аппаратуры. При более глубоком изучении вопроса оказалось, что многие подобные фильтры вообще не имеют встроенных ограничителей перенапряжения. На мой недоуменный вопрос о том, как же такие фильтры защищают от высоковольтных импульсов ЭМИ ЯВ, адресованный производителям, большинство вообще не соизволили ответить. Специалист лишь одной из компаний-изготовителей честно признался, что мой вопрос правильный и существенный и что при использовании их фильтров для защиты от ЭМИ ЯВ действительно нужно добавить к ним внешние элементы защиты от импульсных напряжений. Другая проблема заключается в том, что некоторые из выпускаемых фильтров ЭМИ ЯВ хоть и имеют на входе



Рис. 10. Фильтры ЭМИ ЯВ, производимые компанией MPE, в которых использованы Voltage Dependent Resistors — VDR (варисторы) и Gas Discharge Tubes — GDT (газовые разрядники) в качестве элементов защиты от импульсных напряжений



Рис. 11. Мощные быстродействующие ограничители амплитуды импульсных напряжений на основе лавинных диодов

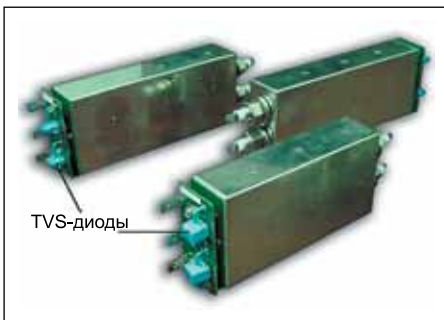


Рис. 12. Фильтры ЭМИ ЯВ компании Captor Corp., снабженные мощными быстродействующими ограничителями амплитуды импульсных напряжений на базе TVS-диодов

встроенные ограничители импульсных напряжений, все же неспособны реально защитить от очень короткого импульса E1 из-за недостаточного быстродействия варисторов и газовых разрядников, используемых в качестве таких ограничителей импульсных напряжений (рис. 10). На просьбу, обращенную к компании-производителю, объяснить, каким образом такой относительно медленный элемент, как варистор, или еще

более медленный газовый разрядник может защитить от короткого импульса E1, ответа не последовало.

Действительно быстродействующими элементами, способными ограничить амплитуду мощного и короткого импульса E1, являются так называемые Transient Voltage Suppressor Diodes — TVS Diodes, выполненные на основе кремниевых лавинных диодов. Элементы такого типа производятся многими компаниями (рис. 11).

Наиболее мощные TVS-диоды (импульсный ток до 10 кА, остающееся напряжение 200–500 В) производятся компанией Bourns, Inc. Такими ограничителями импульсных напряжений снабжены фильтры компании Captor Corp. (рис. 12), которые и рекомендуется использовать при проектировании защищенного МУРЗ.

Контрольные кабели

Контрольные кабели, естественно, должны быть экранированными и с витыми парами. Минимальным требованием к экрану является высокая плотность оплетки (не менее 85%). Значительно лучшим экранирующим

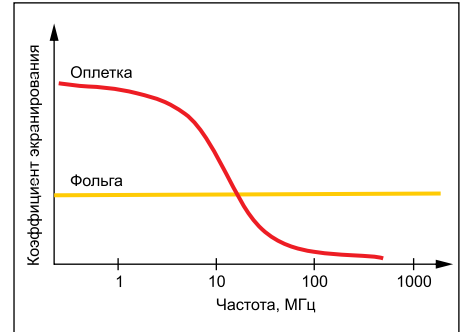


Рис. 13. Зависимость коэффициента экранирования от частоты для экранов в виде оплетки и фольги

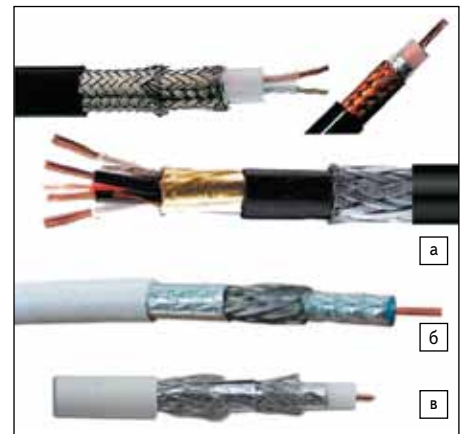


Рис. 14. Кабели с комбинированным (оплетка-фольга) экранированием: а) двойным; б) тройным; в) четверным

шим эффектом обладают кабели с двойной оплеткой. На относительно низких частотах до нескольких десятков мегагерц оплетка обеспечивает лучшее экранирование, чем фольга, главным образом за счет своей толщины. Однако затем экранирующие свойства оплетки резко ухудшаются и становятся почти неприемлемыми еще до частоты 100 МГц. В то же время фольга имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику в области высоких частот, сохраняя удовлетворительные экранирующие способности вплоть до десятков гигагерц (рис. 13).

Поэтому предпочтение следует отдавать кабелям с комбинированным многослойным экраном, содержащим и оплетку, и фольгу (рис. 14).

Очевидно, что в новых проектах должны применяться специальные типы контрольных кабелей, совмещающие парную скрутку проводов и экраны из фольги для каждой такой пары с трехслойным общим комбинированным экраном (например, 48-жильный кабель типа RE-2X(ST)2Y(Z)Y PIMF). Это идеальный случай, однако как быть с десятками старых контрольных кабелей, введенных в существующие шкафы релейной защиты? Менять их на новые? Во многих случаях это бывает слишком сложно и слишком дорого. К счастью, некоторыми компаниями



Рис. 15. Материалы для экранирования неэкранированных кабелей

(например, Holland Shieldind Systems BV) выпускаются специальные сетчатые ленты, предназначенные для обмотки старых неэкранированных контрольных кабелей, а также сетчатые рукава, которые можно просто натянуть на неэкранированные или слабоэкранированные кабели (рис. 15).

Компоновка МУРЗ внутри шкафа

Как уже говорилось, стандартные конструкции релейных шкафов, широко применяемые сегодня в электроэнергетике, не могут служить надежным средством защиты от ЭМИ ЯВ. В то же время терминалы МУРЗ, выполненные в полностью изолированном диэлектрическом корпусе, должны быть надежно защищены и от внешних электромаг-

нитных полей, и от импульсных напряжений, поступающих по внешним кабелям. Как совместить оба требования?

По нашему мнению, решением проблемы может стать размещение МУРЗ внутри дополнительного стального контейнера, реализованного по соответствующей технологии (рис. 16).

Стандартные контейнеры и шкафы из листовой стали, не содержащие окон или щелей, существенно ослабляют ЭМИ. Однако использование оцинкованных листов для их изготовления, а также специальных электропроводных уплотнителей и прокладок значительно повышают их эффективность, поскольку покрытие цинком позволяет выровнять потенциалы на большой площади поверхности (удельное сопротивление стали 0,103–0,204 Ом×мм²/м, а удельное со-

противление цинка 0,053–0,062 Ом×мм²/м). Еще более низким сопротивлением (0,028 Ом×мм²/м) обладает алюминий. Поэтому некоторые компании делают контейнеры и шкафы из специального сплава с торговой маркой Aluzinc. Это сталь, имеющая покрытие, на 55% состоящее из алюминия, на 43,4% из цинка и на 1,6% из кремния. Поверхность, содержащая такое покрытие, обеспечивает высокую степень отражения электромагнитного излучения. Степень ослабления внешнего излучения контейнером, изготовленным по такой технологии, составляет 80–90 дБ на частотах 100 кГц – 10 ГГц.

Контейнер 3 (рис. 16) разделен внутренней перегородкой на две зоны: А — «грязную» и В — «чистую». Терминал МУРЗ в пластмассовом корпусе размещен в «чистой» зоне, свободной от электромагнитных излучений. Контейнер 3 снабжен дверцей 4, обеспечивающей доступ персонала к лицевой панели МУРЗ во время профилактических работ. Контейнер 3 заземлен с соблюдением всех традиционных норм и правил выполнения заземления, что обеспечивает соблюдение требований техники безопасности. При наличии достаточно большого расстояния между МУРЗ и внутренними стенками заземленного металлического контейнера, например 5–7 см, паразитная емкость электронных цепей МУРЗ на «землю» будет очень незначительной, и ее влиянием можно пренебречь, как об этом упоминалось выше.

Заключение

Проблема повышения устойчивости МУРЗ к воздействию ЭМИ ЯВ является многогранной и комплексной. Поэтому для ее решения явно недостаточно усилий одних только энергетиков, занимающихся эксплуатацией МУРЗ. К работе должны подключиться и производители МУРЗ, чтобы совместно найти эффективное решение. Рассмотренные в данной статье технологии и компоненты могут послужить основой для успешной реализации поставленной задачи. ■

Литература

1. Гуревич В. И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты. Проблемы и решения. М.: Инфра-Инженерия, 2014.
2. Ильин В. Ф., Ильин Н. В. Заземление в шкафах микропроцессорных защит // Релейная защита и автоматизация. 2015. № 1.
3. Grounding and Bonding in Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) Facilities. Technical Manual TM 5-690. Headquarters Department of the Army, 17 February 2002.
4. Гуревич В. И. Проблемы стандартизации в релейной защите. СПб: Деан, 2015.
5. Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. N. Y.: Marcel Dekker, 2003.

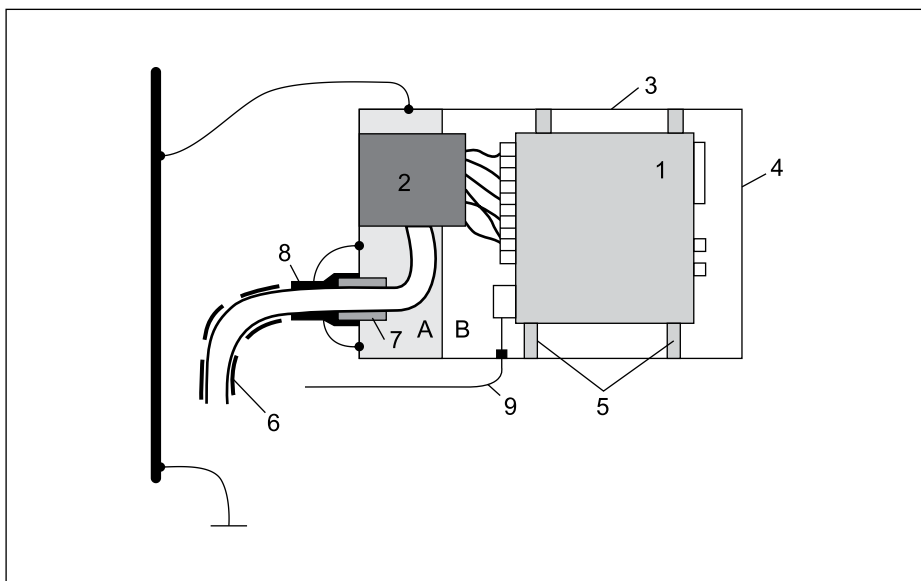


Рис. 16. Предлагаемая компоновка МУРЗ, обеспечивающая повышенную устойчивость к воздействию ЭМИ ЯВ:

- А — «грязный» отсек; В — «чистый» отсек;
 1 — терминал МУРЗ в тщательно изолированном пластмассовом корпусе; 2 — фильтр ЭМИ ЯВ;
 3 — стальной корпус; 4 — дверца стального корпуса; 5 — изоляторы;
 6 — контрольный кабель с двойным экраном; 7 — проходной изолятор;
 8 — металлическая муфта для сочленения оплетки кабеля со стальным корпусом; 9 — ВОЛС