

# Проблема устойчивости микропроцессорных систем релейной защиты и автоматики к преднамеренным деструктивным электромагнитным воздействиям. Часть 2

Владимир ГУРЕВИЧ,  
к. т. н.

*Главная ошибка людей состоит в том, что бед сегодняшних они боятся больше, чем бед завтрашних.*

*Карл Клаузевиц*

## Воздействие ПДЭВ на микропроцессорные устройства релейной защиты

Электромагнитное излучение проникает в электронную аппаратуру прежде всего через различные антенные устройства и кабельные вводы, системы электропитания. Такое же пагубное воздействие могут оказывать токи, наводимые в обшивке, и излучения, проникающие через окна и двери, выполненные из неэлектропроводных материалов, и вентиляционные каналы. Токи, наводимые ЭМИ в наземных и заглубленных кабелях электропитания протяженностью в сотни и тысячи километров, могут достигать тысяч ампер, а напряжение в разомкнутых цепях таких кабелей — миллион вольт. В антенных вводах, длина которых не превышает десятков метров, наводимые ЭМИ токи могут иметь силу в несколько сотен ампер. Электромагнитное излучение, проникающее непосредственно через элементы сооружений из диэлектрических материалов (неэкранированные стены, окна, двери и т. п.), может наводить во внутренней электропроводке токи силой в десятки ампер. Особую опасность представляют собой длинные воздушные линии электропередачи, абсорбирующие излучение с больших площадей и доставляющие его прямо к месту назначения — на входы высокочувствительной электронной аппаратуры. Наличие на этом пути трансформаторов (измерительных и силовых) практически не сказывается на данном процессе из-за значительной внутренней емкости между первичной и вторичной обмотками. А поскольку слаботочные цепи и радиоэлектронные приборы нормально действуют

при напряжениях в несколько вольт и токах силой до нескольких десятков миллиампер, то для их надежной защиты от ЭМИ требуется обеспечить снижение величины токов и напряжений на их входах на несколько порядков. Помимо собственно микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ), повышенной чувствительностью к ЭМИ обладают, как это ни странно, оптические системы передачи данных, широко используемые в релейной защите. Вернее, контроллеры, преобразующие электрические сигналы в оптические на одном конце волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) и восстанавливающие их из оптических на втором конце ВОЛС. Например, испытания на соответствие стандартам ИЕС по электромагнитной совместимости мультиплексора типа FOCUS [35] показали, что они не всегда выдерживают без сбоев и повреждений даже стандартные воздействия. Система SCADA с ее большим количеством микропроцессорных датчиков и измерительных преобразователей, объединенных в компьютерную сеть, — еще один объект воздействия даже ослабленных ЭМИ.

Если возможность использования мощного высотного ядерного взрыва для электромагнитного поражения национальной энергосистемы еще можно рассматривать как гипотетическую, то поражение террористическими структурами отдельных локальных энергосистем с помощью одновременного воздействия на несколько их наиболее важных узлов с помощью неядерных источников ЭМИ вполне возможно в любой момент.

Наиболее уязвимы для воздействия преднамеренных электромагнитных воздействий оказываются системы передачи данных, ис-

пользующие протоколы с широкой полосой частот. К ним относятся ATM 155, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet и др. Последнее объясняется незначительной разницей мощности полезного сигнала и помех в верхней области спектра. Переход от коаксиального кабеля к простой витой паре с целью удешевления (что наблюдается сегодня повсеместно) ведет к еще большей уязвимости системы. А ведь Ethernet на базе витой пары уже сегодня применяется в релейной защите и, в соответствии со стратегией Smart Grid, его использование для управления всеми объектами в электроэнергетике будет только расширяться.

Дискретные электронные элементы имеют гораздо более высокую устойчивость к перенапряжениям и другим неблагоприятным воздействиям, чем интегральные микросхемы [36]. По данным [37], 75% всех повреждений микропроцессорных устройств происходит по причине воздействия перенапряжений. Такие перенапряжения с амплитудой от десятков вольт до нескольких киловольт, возникающие вследствие коммутационных процессов в цепях или при воздействии электростатических разрядов, являются «смертельными» для внутренних микроэлементов микросхем и процессоров. По данным [37], обычные транзисторы (дискретные элементы) могут выдерживать напряжение электростатического разряда почти в 70 раз более высокое, чем, например, микрочип памяти (EPROM) микропроцессорной системы. Компьютеризированное промышленное оборудование (в том числе и МУРЗ) особенно уязвимо к действию ЭМИ, так как оно в основном построено на МОП-приборах высокой плотности, которые очень чувствительны к воздействию высоковольт-

ных переходных процессов. Особенностью МОП-приборов является очень малый уровень энергии (напряжения порядка десятков вольт), необходимый для их повреждения или полного уничтожения.

Известны три степени деградации полупроводниковых приборов при воздействии на них мощного ЭМИ: сбой функционирования, устойчивые изменения параметров, катастрофические необратимые отказы. Необратимый выход из строя полупроводников происходит в основном за счет их перегрева или полевого пробоя [38–40]. Повреждения микропроцессора или элементов памяти, вызванные ослабленными электромагнитными воздействиями, могут носить скрытый характер [15]. Такие повреждения не выявляются никакими тестами и могут проявляться в самые неожиданные моменты. Кроме того, под действием ослабленного защитными мерами ПЭМ могут произойти случайные, обратимые сбои, обусловленные самопроизвольным изменением содержания ячеек памяти, которые называются «мягкими ошибками» (soft failures или soft errors). «Неприятности» такого рода (обратимые, самовосстанавливающиеся нарушения работоспособности) были не свойственны ранее электронным устройствам, выполненным на дискретных полупроводниковых элементах или на обычных микросхемах.

Прогресс последних лет в области нанотехнологий привел к существенной минимизации размеров полупроводниковых элементов (речь идет о единицах и даже долях микрона), уменьшению толщины слоев полупроводниковых и изоляционных материалов, снижению рабочих напряжений, увеличению рабочей скорости, уменьшению электрической емкости отдельных ячеек памяти, повышению плотности размещения элементарных логических ячеек в одном устройстве. Все это вместе взятое привело к резкому повышению чувствительности элементов памяти к электромагнитным воздействиям. Проблема усугубляется тем, что в современных микропроцессорных структурах наблюдается устойчивая тенденция расширения использования элементов памяти. Многие современные интегральные микросхемы высокого уровня интеграции, входящие в состав микропроцессорного устройства, содержат встроенные элементы памяти достаточно большого объема, исправность которых вообще никак не контролируется. Проблема резкого увеличения чувствительности к электромагнитным воздействиям актуальна также и для высокоскоростных логических элементов, компараторов и т. д., то есть практически для всей современной микроэлектроники.

Хорошо известно защитное действие от электромагнитных воздействий клетки Фарадея. Здания из железобетона содержат заземленную сетку, реле защиты располагаются в металлических шкафах, сами МУРЗ имеют металлический корпус. Казалось бы, не клетка, а настоящая «матрешка Фарадея».

Однако все не так просто. Во-первых, импульсы высокой частоты свободно проникают сквозь отверстия в клетке Фарадея, сквозь любые неметаллические вставки и окошки, сквозь стеклянные окна зданий и систему вентиляции. При таком частично ослабленном воздействии ЭМИ на полупроводниковые приборы наблюдались случаи частичного разрушения их *p-n*-переходов, что вело к изменениям характеристик и появлению «мерцающих» сбоев в работе аппаратуры. Такие неисправности связывают значительное количество ресурсов, предназначенных для технического обслуживания, и, кроме того, ограничивают уверенность в надежности аппаратуры. «Мерцающие» неисправности порой очень сложно выявить, это требует повторного многократного выведения оборудования из эксплуатации со значительными потерями времени на диагностику повреждений. Этот фактор также должен приниматься во внимание при оценках степени защиты аппаратуры от электромагнитной атаки, так как частичная или неполная защита может привести к дополнительным неприятностям. Вторая проблема известна под названием «запаздывающего действия ЭМИ» и представляет собой очень опасное свойство ПДЭВ. Этот эффект проявляется в течение первых минут после детонации ядерного заряда или заряда электромагнитной бомбы. В это время ЭМИ, проникнув сквозь электрические системы, создает в них локализованные электромагнитные поля. При спадаании полей возникают резкие перепады напряжения, которые распространяются в виде волн по проводам систем электропитания на довольно большие расстояния от места возникновения первичного ЭМИ. А в-третьих, внешние кабели и провода, выходящие из шкафа релейной защиты (РЗ) и из здания и тянущиеся на многие километры, практически лишают даже ослабляющего эффекта и сами здания, и шкафы.

### Возможные пути решения проблемы защиты микропроцессорной РЗ от ЭМИ

Идеальной защитой от ЭМИ явилась бы полная изоляция электронной аппаратуры от внешнего мира и укрытие помещения, в котором она размещена, сплошным толсто-стенным ферромагнитным экраном. Вместе с тем ясно, что практически реализовать такую защиту для МУРЗ невозможно. Поэтому на практике приходится использовать менее надежные средства защиты: токопроводящие сетки или пленочные токопроводящие покрытия для окон, сотовые металлические конструкции для воздухозаборников и вентиляционных отверстий, специальные электропроводные смазки и прокладки из электропроводной резины, размещаемые по периметру дверей и люков.

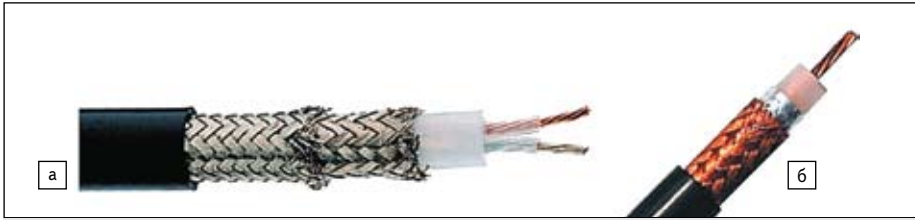
В настоящее время на рынке широко представлены металлические шкафы специальной



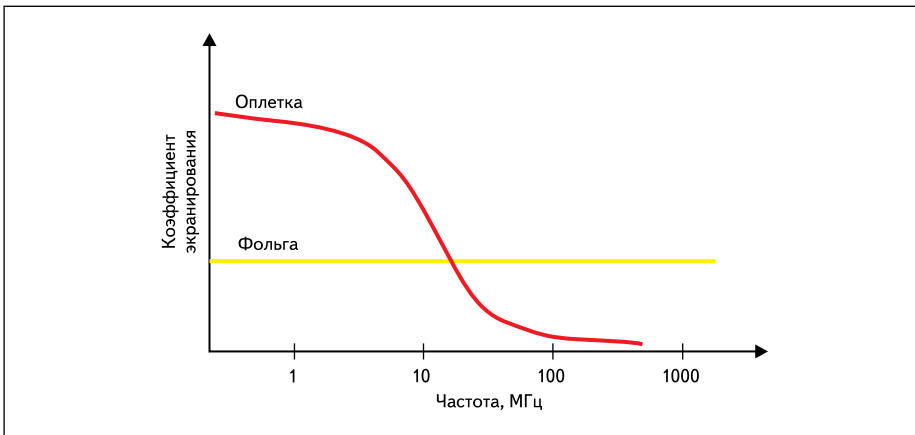
**Рис. 8.** Монтажный шкаф с усиленной защитой от ЭМИ, снабженный специальными петлями, прокладками из электропроводной резины, специальными стыковочными и соединительными элементами, экранированными вентиляционными окнами и т. д. (Equipto Electronics Corp.)

конструкции (рис. 8), обеспечивающие существенное ослабление электромагнитного излучения. Стандартные шкафы из листовой стали, не содержащие окон или щелей, существенно ослабляют ЭМИ. Использование оцинкованных монтажных панелей, а также специальных электропроводных уплотнителей и прокладок существенно повышает эффективность таких шкафов, поскольку покрытие цинком позволяет выравнять потенциалы на большой площади (удельное сопротивление стали 0,103–0,204 Ом·мм<sup>2</sup>/м, а удельное сопротивление цинка 0,053–0,062 Ом·мм<sup>2</sup>/м). Еще более низким сопротивлением (0,028 Ом·мм<sup>2</sup>/м) обладает алюминий. Поэтому некоторые компании выполняют моноблочные шкафы из специального сплава ALUZINC 150 (Aluzinc, зарегистрированная торговая марка концерна Arcelor, — сталь, имеющая покрытие, состоящее на 55% из алюминия, на 43,4% из цинка и на 1,6% из кремния). Поверхность шкафа, содержащая такое покрытие, обеспечивает высокую степень отражения электромагнитного излучения. Соответствующие изделия из такого материала производит и поставляет во многие страны компания Sarel (сегодня это Schneider Electric Ltd., Великобритания). Аналогичные шкафы, предназначенные для защиты от ЭМИ, выпускаются сегодня и другими фирмами: Canovate Group, RF Installations, Universal Shielding, Eldon, Equipto Electronics, ATOS, MFB, European EMC Products, AMCO Engineering, Addison и др. Такого рода шкафы обычно ослабляют излучение на 80–90 дБ на частотах 100 кГц – 1 ГГц.

Контрольные кабели, естественно, должны быть экранированными и с витыми парами.



**Рис. 9.** Кабели с двойным экраном: а) с двойной плетеной оплеткой; б) с двойным комбинированным экраном (плетеная оплетка и фольга)



**Рис. 10.** Зависимость коэффициента экранирования от частоты для экранов в виде оплетки и фольги

Самым минимальным требованием к экрану является высокая плотность оплетки (не менее 85%).

Значительно лучшим экранирующим эффектом обладают кабели с двойной оплеткой (рис. 9). 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 АЧХ, сохраняя удовлетворительные экранирующие способности в очень широком диапазоне частот, вплоть до гигагерц (рис. 10). Поэтому предпочтение следует отдавать кабелям с комбинированным экраном, содержащим и оплетку, и фольгу. Отличную защиту от ЭМИ обеспечивают кабели, совмещающие парную скрутку проводов, экраны из фольги для каждой пары с трехслойным общим экраном из фольги. Например, кабель RE-2X(ST)2Y(Z)Y PIMF позиционируется как сверхустойчивый к помехам. Он используется для передачи аналоговых и цифровых сигналов до 200 кбит/с, может применяться для прокладки на открытом воздухе и в почве, обладает высокой механической прочностью. Его характеристики: парная скрутка проводов с экраном из полиэстеровой фольги для каждой пары; трехслойный общий экран из фольги и оплетка из стальной проволоки; внешняя изоляция — сшитый полиэтилен (XLPE); до 24 пар проводов в кабеле (рис. 11).

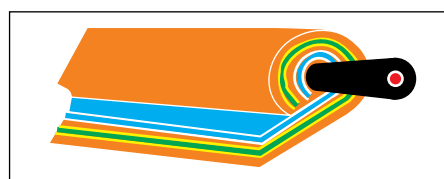
Фирма Belden CDT разработала и запатентовала простой и эффективный способ экра-



**Рис. 11.** Кабель RE-2X(ST)2Y(Z)Y PIMF

нирования кабеля на основе слоя фольги, нанесенного на пленку из полиэстера («полиэфирный сэндвич»). Способ получил название Beldfoil. Компания выпускает кабели, которые имеют два слоя экрана из фольги и оплетки либо даже четыре слоя, где фольга чередуется с оплеткой дважды, что позволяет сочетать их лучшие свойства (рис. 12).

Для успешного функционирования кабельных экранов чрезвычайно важно наличие их эффективного заземления. Как показано в [42], заземление экрана контрольного кабеля с одной стороны является эффективным лишь против емкостных наводок (так называемая электростатическая защита). Однако это совершенно не эффективная мера (коэффициент ослабления помехи  $k = 1$ ) для индуктированных наводок, поскольку данный



**Рис. 12.** Конструкция многослойного экрана типа «полиэфирный сэндвич» компании Belden CDT

экран не обеспечивает цепи для замыкания тока помехи. При заземлении экрана с двух сторон появляется дополнительная цепь (экран), обладающая значительно меньшим импедансом для высокочастотного сигнала, чем земля. В результате рабочий сигнал делится на две части, одна из которых (низкочастотная) по-прежнему возвращается через землю, а вторая (высокочастотная) — через экран кабеля. Таким образом, для высокочастотной составляющей ток в экране равен току в центральной жиле, направленному встречно, и компенсируется благодаря электромагнитной связи между экраном и центральной жилой. Так обеспечивается защита от высокочастотного излучения с центральной жилы во внешнее пространство (то есть на соседние кабели) с коэффициентом ослабления помехи  $k = 3-20$ . Эта система работает также эффективно и при внешнем электромагнитном воздействии на экран, при котором наведенный в экране высокочастотный сигнал замыкается через землю. При выполнении присоединения экрана к земляной шине следует иметь в виду, что никакие «накрутки» соединительного провода на экран недопустимы, как недопустимо и свертывание в кольца длинного соединительного провода между экраном и земляной шиной. Каждый дополнительный виток этого провода увеличивает импеданс системы заземления на высоких частотах и резко снижает ее эффективность. При прокладке экранированных кабелей на подстанциях может использоваться такое дополнительное решение, повышающее эффективность экранирования, как прокладка параллельно трассе кабелей медной шины выравнивания потенциалов, заземленной с двух сторон. Ее действие обусловлено тем, что импеданс медной шины на высоких частотах значительно меньше импеданса земли (и даже импеданса экрана), и поэтому основная часть высокочастотного тока импульсной помехи будет протекать через эту шину, а не через экран.

Если новые кабели с многослойными экранами из фольги способны эффективно ослаблять внешние электромагнитные воздействия, то этого не скажешь о кабелях старого типа, снабженных жиденькой оплеткой. При наличии таких старых кабелей эффективного ослабления воздействия внешнего электромагнитного поля можно добиться за счет прокладки их в металлических лотках и трубах. Наименьшим экранирующим эффектом обладают пластмассовые лотки с металлическим напылением, широко используемые для прокладки контрольных кабелей. Из-за очень тонкого электропроводного слоя такая конструкция начинает работать эффективно лишь на частотах 600 МГц и выше. На частотах ниже 200 МГц она вообще не работает [42]. Вместе с тем алюминиевые лотки в сочетании с медной оплеткой на кабелях способны ослабить наводимые напряжения в десятки раз, и поэтому они могут найти широкое применение в качестве эффективного средства

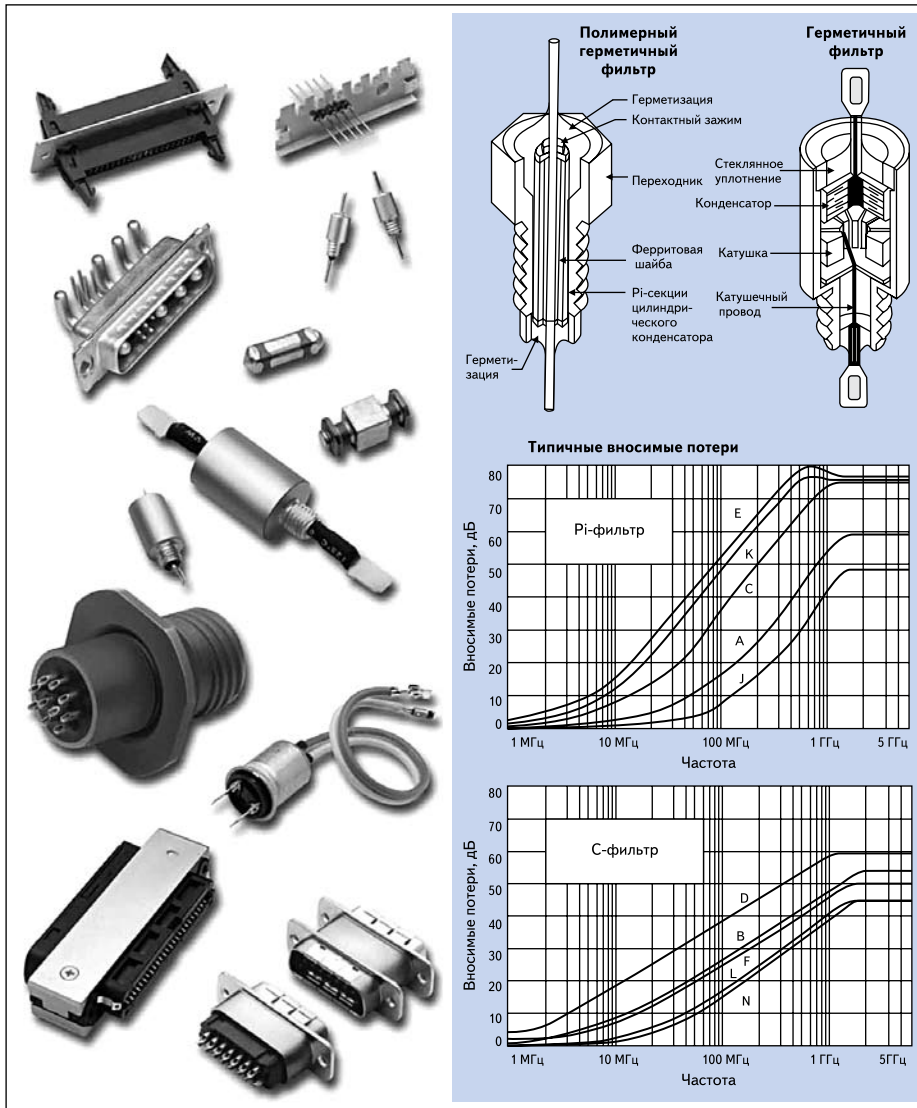


Рис. 13. Некоторые из соединителей вводов со встроенными фильтрами, выпускаемые компанией Spectrum Control

защиты от ЭМИ. Однако наибольшее ослабление наводок в широком диапазоне частот может обеспечить прокладка контрольных кабелей в стальных водопроводных трубах.

Значительно более сложной технической проблемой, чем экранирование кабелей, считается защита от проникновения ЭМИ в аппаратуру через различные кабельные вводы и соединители (разъемы).

Сегодня на рынке достаточно широко представлены специальные соединители, снабженные встроенными ЭМИ-фильтрами (рис. 13). Такие изделия выпускаются многими компаниями: Amphenol, Spectrum Control, Spectrum Advanced Specialty Products, EMP Connectors, ERNI Electronics, Sabritec, MPE, Glenair, Captor, Lindgren Ray Proof и др.

Обычно такие фильтры изготавливаются на основе ферритовых колец или комбинации индуктивностей и емкостей (рис. 14), смонтированных непосредственно внутри соединителя (рис. 15). Большое количество фильтрующих элементов установлено между двумя платами.

В качестве средств защиты кабельных вводов широко используются фильтры, а также искровые разрядники, металлоксидные варисторы и высокоскоростные супрессоры на основе зереновских диодов. Целый спектр таких фильтров производит RFI Corporation (рис. 16). Диапазон фильтров, выпускаемых этой компанией, охватывает и область больших токов и высоких напряжений:

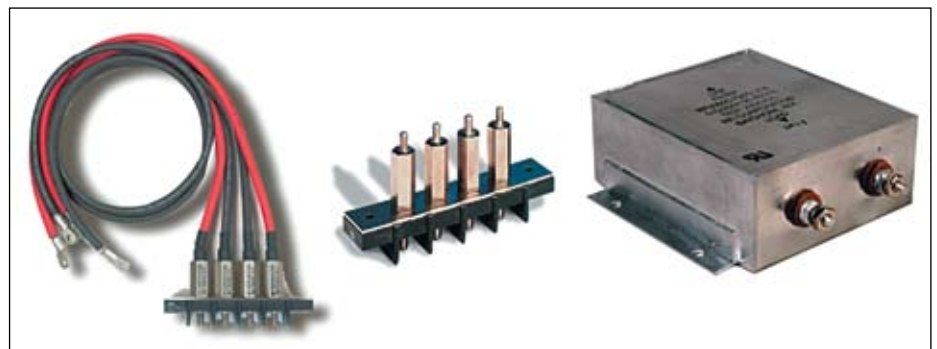


Рис. 16. Фильтры для кабельных вводов, производимые RFI Corporation

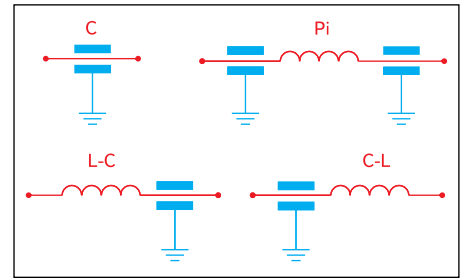


Рис. 14. Типовые схемы фильтров, встроенных в соединители

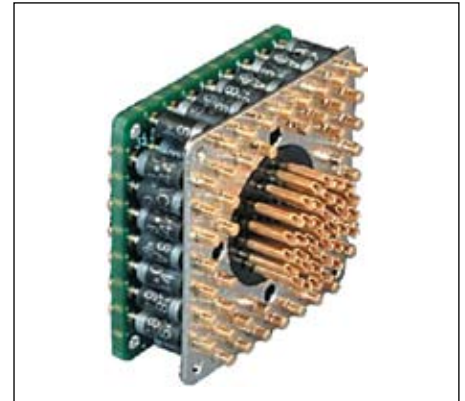


Рис. 15. Конструкция одного из соединителей со встроенными фильтрами компании Glenair

от 12 В постоянного тока до 5500 В переменного, при токах 0,01–5000 А.

Силовые фильтры с широкой частотной характеристикой, специально предназначенные для защиты от ВЭМИ, также выпускают многие компании. Отличными характеристиками обладают силовые фильтры Captor Corp. (рис. 17). Не хуже и силовые фильтры фирмы EPCOS (рис. 18) на рабочие токи до 150 А (ударный ток до 12 кА), напряжение 440 В. Падение напряжения в этих фильтрах для рабочих токов составляет <1% на фазу. Затухание 100 дБ в частотном диапазоне 14 кГц – 40 ГГц. Фирма EPCOS выпускает также трехфазные фильтры с аналогичными частотными характеристиками на рабочие токи до 1600 А, имеющие вид шкафов, а также небольшие маломощные многоканальные фильтры для цепей управления и контроля.



Рис. 17. Силовые фильтры Captor Corp. в герметичном исполнении

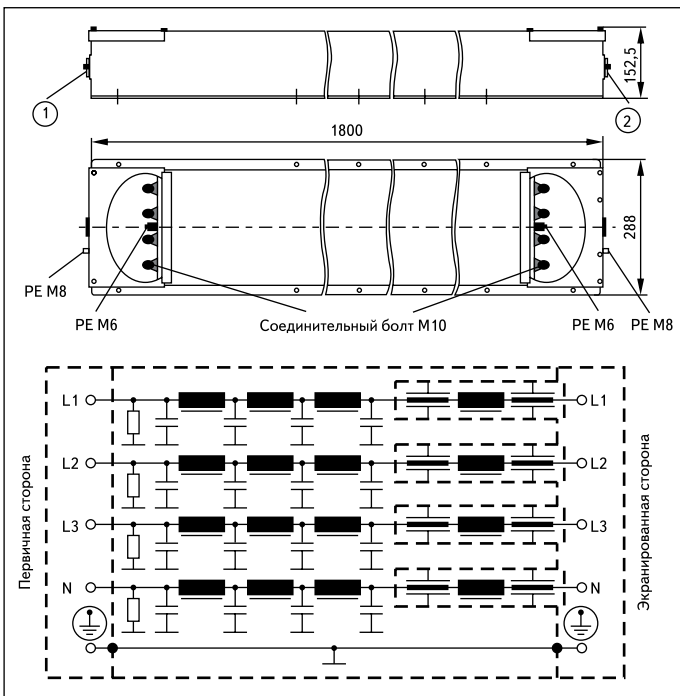


Рис. 18. Габаритные размеры и схема силового трехфазного фильтра фирмы EPCOS

Для защиты силовых цепей и цепей питания многими компаниями выпускаются ограничители перенапряжений на основе оксидно-цинковых варисторов, предназначенные для подключения к сетям с напряжением 220/380/660 В и допускающие протекание разрядных токов до 80 кА. Часто такие устройства содержат последовательно включенные предохранители, защищающие сеть от короткого замыкания при повреждении варистора и индикатор перегорания предохранителя (рис. 19а).

Металлоокисные варисторы обладают большой мощностью, однако имеют недостаточно высокое быстродействие (для целей защиты от ВЭМИ). Их характеристики ухудшаются (деградируют) при неоднократном воздействии мощных импульсных нагрузок. Эти недостатки отсутствуют у высокоскоростных кремниевых ограничителей перенапряжений, выполненных на базе зерновских диодов (Transient Voltage Suppressor Diodes или TVS Diodes), действие которых основано на резком лавинообразном изменении сопротивления от относительно высокого значения практически до нуля при превышении приложенного к ним напряжения определенной пороговой величины (рис. 20). Кроме того, в отличие от варисторов, характеристики таких ограничителей перенапряжений (супрессоров) после многократных воздействий высоких напряжений и переключений режимов не ухудшаются (рис. 20). К сожалению, большинство современных супрессоров такого типа имеют ограниченную импульсную мощность (до 1500 Вт при напряжениях до 600 В) и пригодны для

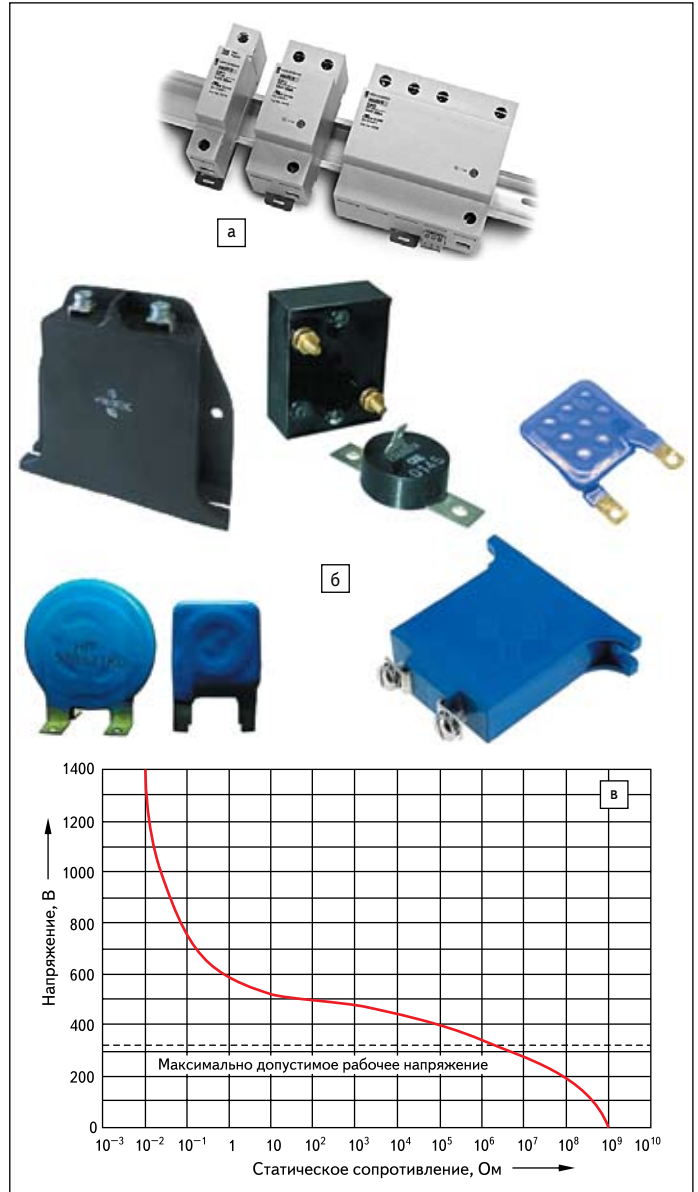


Рис. 19. а) Защитные устройства большой мощности на основе металлоокисных варисторов компании Square D (Schneider Electric); б) мощные варисторы различных типов с номинальным напряжением 130–1100 В и разрядным током от 3–100 кА; в) типовая ВАХ оксидно-цинкового варистора

защиты входов электронной аппаратуры, но не для защиты силовых цепей и цепей питания. Однако известной компанией Littelfuse, специализирующейся на разработке и производстве элементов защиты от перенапряжений, был налажен выпуск супрессоров значительно большей импульсной мощности — до 30 кВт, допускающих протекание разрядных импульсных токов до нескольких сотен ампер. Диодные супрессоры, как и варисторы, можно соединять параллельно для увеличения разрядного тока.

Для повышения эффективности защиты от перенапряжений можно использовать также параллельное соединение разнотипных ограничителей перенапряжения, например таких, как варисторы и полупроводниковые супрессоры (рис. 21). Такое гибридное устройство обладает прекрасными характеристиками. Первым в нем всегда срабатывает быстродействующий супрессор (1), реагирующий на импульс даже с очень крутым передним фронтом и поглощающий часть его энергии. Разрядный ток ограничивается резисторами (2), что предотвращает разрушение супрессора.

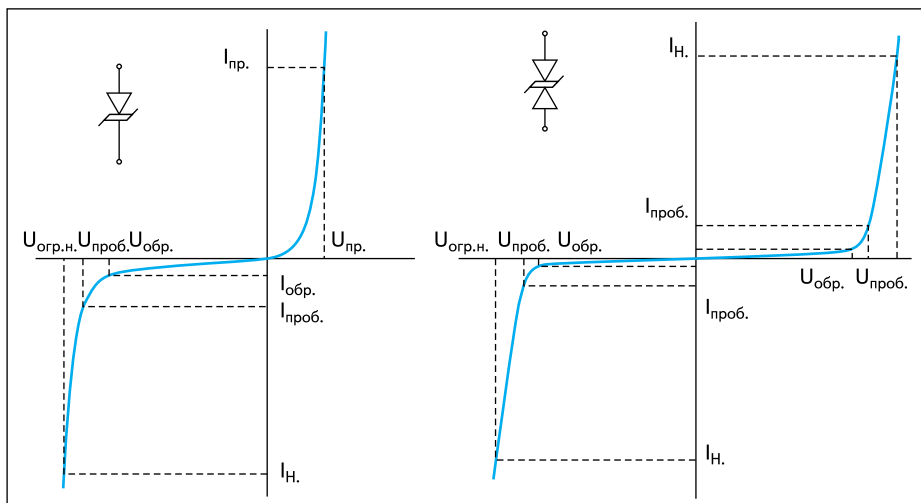


Рис. 20. Вольт-амперные характеристики однонаправленных (для постоянного тока) и двунаправленных (для переменного тока) диодных супрессоров

Падение напряжения на резисторах (2) повышает напряжение на варисторе (3), что приводит к резкому уменьшению его сопротивления и шунтированию резисторов. Оставшаяся (большая) часть энергии поглощается мощным варистором.

При разработке средств предохранения от воздействия интенсивных ЭМИ всегда следует иметь в виду, что только один из методов не в состоянии обеспечить эффективную защиту. Лишь совместное, комплексное использование всех возможных видов защиты может обеспечить наилучший результат.

Если говорить о защите зданий и отдельных помещений от проникновения ЭМИ, то наиболее мощной является защита с использованием специальных панелей, содержащих отражающие и поглощающие ЭМИ слои (рис. 22).

Однако создание полностью экранированного помещения является достаточно дорогим мероприятием. Поэтому на практике определенный интерес представляют более дешевые промежуточные варианты с использованием, например, защитной краски, пленки, штор, драпировок и т. п. За последние годы существенные результаты достигнуты в области создания электропроводных лакокрасочных и строительных материалов с уникальными свойствами и широкими возможностями применения, а также прозрачных токопроводя-

щих покрытий, которые могут быть нанесены на стекло. Электропроводные краски, лаки и спреи на основе меди, алюминия, бронзы, никеля и графита выпускаются многими фирмами, например Caswell, YSHIELD EMR-protection, Less EMF, Gold Touch, Spraylat, Cybershield, Applied Coating Technologies, BM Industria Bergamasca Mobili S. p. a. Хорошими показателями обладает защитная краска «Тиколак» московской фирмы «Тико». «Тиколак» — новый универсальный неметаллический электропроводный лакокрасочный материал, защищенный патентом РФ и представляющий собой смесь углеродосодержащего наполнителя и полимерного связующего в соотношении: эпоксидное связующее 8–20%, наполнитель (смесь графита с сажей) при массовом соотношении 0,1:1,0:11 — 39%, отвердитель 0,5–1,5%, органический растворитель — остальное. По утверждению специалистов «Тико», этот материал способен экранировать электромагнитные излучения в широком диапазоне частот, вплоть до 300 ГГц. «Тиколак», нанесенный на внутренние или внешние поверхности зданий, во много раз снижает проникающую способность электромагнитного излучения (по данным разработчика, один слой «Тиколака» толщиной всего в 70 мкм снижает интенсивность ЭМИ в 3–3,5 раза). Его можно наносить на различные строительные материалы — ДСП, дерево, фанеру, гипсовые

плиты, а также на любой гибкий материал — ткань, кожу, пленки, бумагу и т. п. В свою очередь, на покрытие из «Тиколака» можно наносить любой отделочный материал — обои, краску, керамическую плитку и т. д., при этом «Тиколак» намного дешевле зарубежных аналогов (около \$70 за 1 кг).

Для получения прозрачного электропроводного стекла, отражающего ЭМИ, используют полупроводниковые пленки оксидов различных металлов: олова, индия, цинка и др. Технология изготовления таких стекол очень сложная, трудоемкая и требует дорогостоящего оборудования и квалифицированного персонала. Упомянутой выше фирмой «Тико» разработан и запатентован (патент РФ № 2112076) высокотехнологичный и экономичный способ нанесения на стекло электропроводящих покрытий на основе оксидов индия и олова. Прозрачное электропроводящее стекло производится многими компаниями, например Tycoson Technoglass, Pilkington, Shenzhen Wanyelong Industry Co., InkTec и др.

Компанией «Альфалол» из Санкт-Петербурга на основе шунгитовых пород созданы строительные материалы, совмещающие в себе свойства обычных строительных материалов и достаточно высокую электропроводность. Это определяет способность материала экранировать электромагнитные излучения [43]. Шунгит — группа твердых углеродистых минеральных веществ, представляющих в главной массе аморфные разновидности углерода, близкие по составу к графиту. Химический состав шунгита непостоянен: в среднем это 60–70% углерода и 30–40% золы, в которой содержится 35–50% окиси кремния, 10–25% окиси алюминия, 4–6% окиси калия, 1–5% окиси натрия, 1–4% окиси титана, а также примеси других элементов.

По данным компании «Альфалол», шунгитовые композиционные радиоэкранирующие материалы по способам реализации экранов из них могут быть разделены на два класса:

- Конструкционные материалы, к числу которых относится бетон, кирпич, кладочный раствор. Они способны обеспечить ослабление электромагнитной энергии в диапазоне частот более 100 МГц на уровне не менее 100 дБ. По физико-механическим характеристикам шунгитовые конструкционные материалы не уступают традиционным строительным

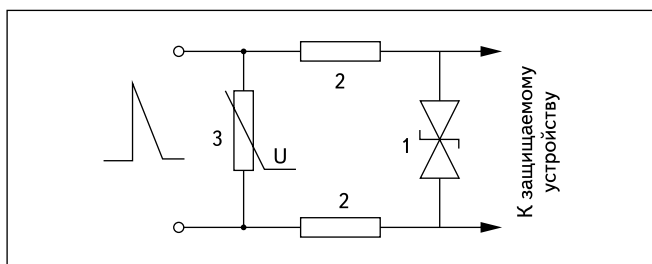


Рис. 21. Гибридное защитное устройство: 1 — полупроводниковый супрессор; 2 — токоограничивающие резисторы; 3 — мощный варистор

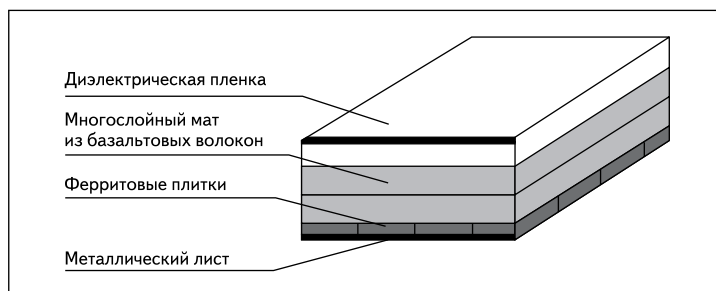


Рис. 22. Структура интегрированной панели «Феррилар-5» для защищенного помещения



Рис. 23. Электропроводные пленки, нити и ткани, ослабляющие ЭМИ (до 80 дБ), производства Koolon Fiber Tech. Corp.



Рис. 24. Дистанционная защита линий, выполненная на МУРЗ типа MiCOM P437 (внизу) и электромеханических реле типа LZ-31 (вверху), включенных на параллельную работу

аналогам, прошли испытания в конструкциях (бетон в панелях перекрытий, кирпич в кладках) и признаны соответствующими существующим требованиям.

- Материалы для реконструкции, такие как штукатурные растворы и мастики, позволяющие переоборудовать обычные сооружения в экранированные. Мастики способны обеспечить экранирующий эффект на уровне не менее 30 дБ в диапазоне свыше 30 МГц при толщине слоя в 2–3 см. А штукатурный состав «Альфапол ШТ-1» при толщине слоя штукатурки 15 мм в диапазоне частот 10 кГц – 35 ГГц обеспечивает ослабление ЭМИ на 10–15 дБ.

В качестве дополнения к стенам помещений, содержащих шунгит, можно использовать электропроводные шторы и ткани, напольные покрытия, производимые некоторыми фирмами (рис. 23).

### Повышение живучести МУРЗ

Меры по повышению живучести МУРЗ должны предусматривать, по нашему мнению, как чисто технические усовершенствования, так и организационные мероприятия.

К техническим усовершенствованиям можно отнести требование снабжать каждое устройство отдельным модулем со специальными фильтрами против ЭМИ (ферритовые кольца, комбинация различных разрядников и т. п.). Через него должны проходить все входные и все выходные цепи МУРЗ, он хорошо вписывается в концепцию модульной конструкции, предложенную нами [44], а также позволяет легко заменять его в течение всего периода эксплуатации МУРЗ при появлении на рынке новых технологичей защиты и новых фильтрующих модулей. Этой концепцией предусмотрено, в частности, введение стандарта на модульную конструкцию МУРЗ и переход на производство таких устройств в виде стандартизованных

плат, которые заказчик мог бы компоновать по своему усмотрению в шкафах РЗ, снабженных усиленной защитой от ЭМИ.

В настоящее время в России предпринимаются попытки повысить устойчивость системы релейной защиты за счет введения двух уровней. Согласно предложению Б. Д. Щедрикова [45], первый уровень РЗ должен быть образован МУРЗ, а второй — электромеханическими реле тока типа РТ-40 и реле времени типа РВМ-12. Оба комплекта реле (МУРЗ и электромеханика) включены на параллельную работу, причем время срабатывания электромеханической защиты выбрано на 0,1 с больше времени срабатывания МУРЗ. По мнению автора предложения, электромеханика должна подстраховать устройство релейной защиты в случае несрабатывания при аварийном режиме (то есть, фактически, таким включением реализуется логическая функция «ИЛИ»). Следует заметить, что включение МУРЗ и электромеханики на параллельную работу не является чем-то новым и давно используется на практике (рис. 24) [46].

Однако при таком включении не решена проблема ложных срабатываний МУРЗ при воздействии на них ЭМИ, которые могут привести к не менее серьезным проблемам в энергосистеме, чем несрабатывание. В продолжение этой идеи тот же автор высказал предложение вместо параллельного включения электромеханики и МУРЗ использовать их включение таким образом, чтобы электромеханическое реле типа КРБ-126 давало разрешение на выполнение операции включения отключающей катушки выключателя микропроцессорным реле (то есть, по сути дела, в этом случае реализуется логическая функция «И»). Такое включение обеспечит, конечно, гораздо лучшую устойчивость РЗ к ПДЭВ, однако снизит общую надежность РЗ (это неизбежная цена за повышение устойчивости защиты к ПДЭВ).

Справедливости ради следует отметить, что принцип повышения устойчивости МУРЗ к мощным ЭМИ путем использования электромеханических реле, разрешающих действие МУРЗ, был предложен нами в [47] за 15 лет до публикации предложения о двухуровневой РЗ, а идея о необходимости создания гибридного (механо-полупроводникового) устройства РЗ была предложена нами почти 20 лет тому назад [48]. Причем речь идет не о голых абстрактных идеях, а о реально разработанных конструкциях [49–51].

С появлением новой элементной базы (миниатюрные высоковольтные герконы, мощные герконы с большими коммутируемыми токами, небольшие по размерам транзисторы и тиристоры с рабочим напряжением 1200–1600 В и коммутируемыми токами в десятки ампер) появились, естественно, и новые возможности по созданию гибридных реле (в качестве самостоятельных реле защиты или в качестве пусковых органов для МУРЗ) (рис. 25).

В публикации [52] нами предпринята попытка продемонстрировать на конкретных схемных решениях возможности современных гибридных реле. В качестве электромеханической части во всех этих конструкциях нами рекомендуется использовать герконы. Их отличительными особенностями являются высокая надежность (при соблюдении нормируемых ограничений по току и напряжению); высокое быстродействие (доли и единицы миллисекунды); отличная защита от пыли и влаги; отсутствие необходимости зачистки и регулировки в процессе эксплуатации; малые размеры; полная гальваническая развязка цепи управления (катушка) от выходной цепи (контакты); возможность очень простыми средствами получить высоковольтную изоляцию между цепью

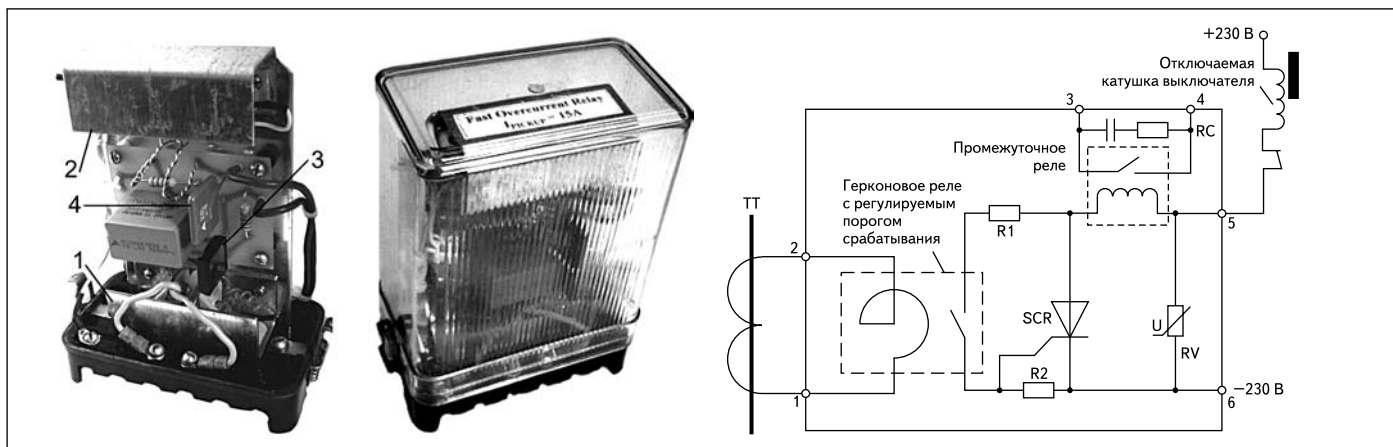


Рис. 25. Быстродействующее гибридное реле токовой отсечки.

1 — модуль регулируемого герконового реле; 2 — промежуточное герконовое реле в ферромагнитном экране; 3 — высоковольтный тиристор; 4 — варистор

управления и выходной цепью [53]. Еще одним конкретным примером такого гибридного реле защиты может служить быстродействующее реле токовой отсечки, специально разработанное нами для делительной автоматики сети (рис. 25) [54]. Это очень простое устройство, содержащее минимальное количество элементов, выбранных с большими запасами по напряжению. Так, например, тиристор рассчитан на напряжение 1200 В, а миниатюрный вакуумный геркон — на 2000 В. Изоляция между входной катушкой и герконом выдерживает напряжение в 5 кВ, которое может быть при необходимости свободно увеличено. Параллельно защитному варистору может быть дополнительно установлен супрессор, как показано на рис. 21. Опыт создания гибридных герконо-полупроводниковых устройств обобщен нами в книге [55].

Как следует из вышеизложенного, в связи с новыми опасностями, возникшими в последние годы, еще рано списывать со счетов электромеханические реле защиты, устойчивые к воздействию мощных ЭМИ. Наоборот, должны быть развернуты работы по разработке новых типов электромеханических реле, специально предназначенных для использования в качестве резервных защит, на основе современных материалов и технологий.

Как было сказано, методы повышения живучести МУРЗ не сводятся к чисто техническим усовершенствованиям их конструкции. К организационным мероприятиям можно отнести создание запасов комплектов печатных плат (модулей) МУРЗ и их хранение. Поскольку повреждаться могут электронные устройства, даже не находящиеся в работе, хранение печатных плат МУРЗ должно осуществляться в специальных хорошо экранированных металлических ящиках. Модули центрального процессора должны быть полностью готовыми к запуску без необходимости программирования и введения уставок. Поскольку обеспечить комплектами запасных плат абсолютно все МУРЗ в энергосистеме невозможно по экономическим причинам,

должны быть заранее определены наиболее важные устройства РЗ, и именно они должны быть снабжены комплектами запасных плат. Для МУРЗ, не имеющих комплектов запасных плат, должны быть предусмотрены методы корректного выведения их из работы. На подстанциях и электростанциях должны храниться также укомплектованные и настроенные комплекты панелей защит на базе электромеханических реле, которые можно было бы быстро ввести в работу в случае возникновения массовых проблем с МУРЗ. ■

### Литература

35. Гуревич В.И. Оптоэлектронные трансформаторы: панacea или частное решение частных проблем // Вести в электроэнергетике. 2010. № 2.

36. Гуревич В. Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: мифы и реальность // Проблемы энергетики. 2008. №№ 5–6.

37. Clark O.M., Gavender R.E. Lighting Protection for Microprocessor-based Electronic Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 1990. Vol. 26. № 5.

38. Блудов С.Б., Гадецкий Н.П., Кравцов К.А. и др. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7, 8.

39. Панов В.В., Саркисян А.П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. №№ 10–12.

40. Антипин В.В., Годовицын В.А., Громов Д.В., Кожевников А.С., Раваев А.А. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 1.

41. Phadke A. G. Hidden failures in electric power systems // International Journal of Critical Infrastructures. 2004. Vol. 1. № 1.

42. Гуревич В.И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Ч. 2 // Компоненты и технологии. 2010. № 3.

43. Байдин Ф.Н., Никитина В.Н., Сафронов Н.Б. Электрофизические характеристики и радиозащитные свойства магнетиально-шунгитовых композиционных строительных материалов // Сборник докладов IX Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. СПб. 2006.

44. Гуревич В.И. Новая концепция построения микропроцессорных устройств релейной защиты // Компоненты и технологии. 2010. № 6.

45. Щедриков Б.Д. Электромеханические устройства релейной защиты и автоматики в энергетике: настоящее и будущее // Релейная защита и автоматизация. 2010. № 1.

46. Ответ В.И. Гуревича оппонентам-релейщикам // Вести в электроэнергетике. 2009. № 1.

47. Гуревич В.И. О некоторых путях решения проблемы электромагнитной совместимости релейной защиты в электроэнергетике // Промышленная энергетика. 1996. № 3.

48. Гуревич В.И. Принципы повышения помехоустойчивости статических реле тока // Энергетика и электрификация. 1992. № 2.

49. Гуревич В.И. Пути повышения электромагнитной совместимости релейной защиты в электроэнергетике // Промышленная энергетика. 1995. № 2.

50. Гуревич В.И. О развитии средств релейной защиты электрических сетей // Энергетическое строительство. 1994. № 1.

51. Гуревич В.И. Универсальные защитные реле максимального тока нового поколения // Электротехника. 1994. № 1.

52. Гуревич В.И. Гибридные герконо-полупроводниковые устройства — новое поколение реле защиты // Проблемы энергетики. 2007. №№ 9–10.

53. Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. New York – Basel: Marcel Dekker Inc. 2003.

54. Гуревич В.И. Высокостабильное герконо-полупроводниковое реле тока с повышенным быстродействием // Энерго-Инфо. 2007. № 2.

55. Gurevich V. Electronic Devices on Discrete Components for Industrial and Power Engineering // CRC Press (Taylor & Francis Group). 2008.