

# Проблемы защиты систем телекоммуникации на объектах электроэнергетики от электромагнитного импульса

**Системы телекоммуникации на объектах электроэнергетики играют огромную роль в приеме и передаче данных, в телеизмерениях, телеуправлении, связи. Вместе с тем среди множества других важнейших электрических и электронных систем в электроэнергетике они являются наиболее чувствительными к электромагнитному импульсу высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) и одновременно наименее защищенными. Такое положение дел не может считаться нормальным и требует принятия соответствующих мер. К сожалению, известные технические средства часто бывают слишком дороги и, несмотря на рекламные объявления, далеко не всегда способны надежно защитить системы телекоммуникаций от ЭМИ ЯВ. Анализ ситуации и свое решение проблемы предлагает автор статьи.**

Владимир ГУРЕВИЧ

Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва, при котором у поверхности земли создается импульсное электрическое поле с напряженностью до 50 кВ/м, является мощным поражающим фактором, направленным на выведение из строя инфраструктуры страны и рассматривается военным командованием во многих странах как очень эффективный и перспективный вид не летального оружия. Высокая эффективность поражения инфраструктуры обусловлена повсеместным насыщением всех современных систем (в первую очередь электроэнергетики) микроэлектронной и микропроцессорной техникой, с одной стороны, и практически полной незащищенностью этой техники в гражданских секторах от ЭМИ — с другой [1].

Среди различных систем в электроэнергетике особой чувствительностью к ЭМИ отличается система телекоммуникации, включающая системы приема и передачи данных, телеизмерений, телеуправления, связи. Это обусловлено тем, что современная сложная электронная телекоммуникационная аппаратура использует очень низкие (по сравнению с другими электрическими системами) рабочие уровни напряжений, не превышающие 3,5–5 В, и поэтому имеет соответствующие низкие уровни изоляции всех входных и выходных цепей. Вот почему обычные требования стандартов по электромагнитной совместимости к низковольтной электрической и электронной аппаратуре, предусматривающие среди прочего испытание высоковольтными импульсами напряжения (2 и 4 кВ),

не распространяются на порты телекоммуникаций, если они имеются в такой аппаратуре. Эта оговорка приведена во всех стандартах, предусматривающих подобные испытания. А если учесть, что по телекоммуникационным каналам в электроэнергетике передаются в реальном времени данные об аварийных режимах между микропроцессорными устройствами релейной защиты и осуществляется телеуправление положением высоковольтных выключателей, обуславливающих состояние электрической сети, то становится понятной актуальность проблемы защиты систем телекоммуникации от ЭМИ.

Во многих случаях острота проблемы была снята при переходе от гальванически связанных цепей и кабелей с медными жилами к волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), хотя и здесь остается актуальной проблема защиты многочисленных микропроцессорных оконечных устройств, осуществляющих преобразование электрических сигналов в оптические и обратно. Однако на очень многих объектах электроэнергетики по-прежнему эксплуатируется система телекоммуникации, оснащенная высокочувствительной электронной аппаратурой с гальванически связанными цепями. Поэтому возникает вполне закономерный вопрос о возможных путях реконструкции такой системы с целью повышения ее защищенности от ЭМИ.

Существуют некоторые общеизвестные меры повышения устойчивости аппаратуры к ЭМИ, не зависящие от выбранного направления реконструкции. В первую очередь они включают модернизацию шкафов с элек-

тронной аппаратурой, обеспечивающую эффективную защиту внутреннего оборудования от электромагнитного излучения, а также защиту и резервирование системы электропитания. Эти меры и средства их осуществления были рассмотрены ранее [2]. В настоящей публикации описаны технические средства, обеспечивающие защиту каналов передачи данных.

Очевидным решением проблемы является оснащение действующей телекоммуникационной аппаратуры оптическими линиями, состоящими из преобразователей электрических входных и выходных сигналов в оптические и обратно, и передача этих сигналов между такими преобразователями по волоконно-оптическому кабелю. Преобразователи различных видов электрических сигналов в оптические и обратно, пригодные для использования в системах телекоммуникации, сегодня широко представлены на рынке (рис. 1), а потому проблема защиты каналов передачи данных при использовании преобразователей решается довольно просто.

Значительно более сложной и неординарной становится защита существующей телекоммуникационной аппаратуры с гальваническими связями по кабелям с медными жилами. Стандартным средством защиты такой аппаратуры от ЭМИ, предусмотренным стандартами и предлагаемым многочисленными производителями, является применение специальных фильтров, с высокой эффективностью подавляющих электрические сигналы выше определенной частоты.



Рис. 1. Различные типы преобразователей электрических сигналов в оптические и обратно, пригодные для использования в системах телекоммуникации

Однако, как было показано в [3], использование специальных дорогостоящих фильтров для подавления одного короткого импульса длительностью в доли микросекунды — совершенно ненужная мера. К тому же частотный диапазон многих современных систем связи и передачи данных находится в области спектра ЭМИ, который должен подавляться такими фильтрами, а сами фильтры в большинстве представляют собой низковольтные устройства, не допускающие приложения к их входу высоковольтных импульсов. В связи с этим защита телекоммуникационной аппаратуры должна осуществляться лишь от воздействия импульса высокого напряжения.

Для защиты электронной аппаратуры от импульсов высокого напряжения предусмотрены технические средства, основанные на элементах, резко уменьшающих сопротивление при приложении к ним повышенного по сравнению с номинальным напряжения:

- газовые разрядники (Gas Discharge Tube — GDT);
- металлоксидные варисторы (Metal Oxide Varistor — MOV);
- тиристорные супрессоры, динисторы (Thyristor Surge Suppressor — TSS; Sidac);
- диодные супрессоры (Transient Voltage Suppressor or TVS-diode).

Сравнительная характеристика лучших в своем классе (по результатам нашего исследования) образцов этих элементов по совокупности основных параметров, представляющих особый интерес с точки зрения возможности их использования в системах телекоммуникации, приведена в таблице 1.

Такой важнейший показатель, как время реакции (быстродействие) элемента, очень редко указывается в каталогах в явном виде. Это связано со многими причинами, в частности с зависимостью данного времени от скорости нарастания импульса напряжения, от формы и длины выводов конкретных элементов. Даже когда это время

отображено в каталогах, оно мало о чем говорит, поскольку для его уменьшения производители часто испытывают полуфабрикат (фактически материал, из которого изготовлен элемент). К тому же в реальных схемах быстродействие защитного элемента будет зависеть и от параметров защищаемой цепи. Однако из литературы известно, что наилучшим быстродействием (единицы наносекунд) обладают диодные супрессоры. За ними следуют тиристорные супрессоры с их десятками наносекунд, потом варисторы с временем реакции в несколько десятков или сотен наносекунд. Замыкают этот ряд газовые разрядники со временем срабатывания 0,2–0,5 мс (длительность импульса ЭМИ — наносекунды). Другим недостатком газовых разрядников являются высокие напряжения срабатывания и остаточное напряжение. Причем даже у самых низковольтных разрядников напряжение срабатывания (пробоя) резко повышается с возрастанием крутизны приложенного импульса напряжения.

Например, по данным стандарта IEC 61643-311 [4], минимальное напряжение разряда разрядников возрастает с 75 В на постоянном токе до 650 В при скорости нарастания напряжения 1 кВ/мкс. Очевидно, что для импульса ЭМИ с его высокой крутизной (скоростью нарастания) это значение будет еще выше. Становится понятным, что газовые разрядники сами по себе не могут обеспечить защиту электронного оборудования от ЭМИ.

Вот почему представляются весьма странными выпускаемые некоторыми компаниями устройства для защиты от ЭМИ, в которых в качестве основного (а часто и единственного) элемента защиты от перенапряжений используются газовые разрядники (рис. 2).

Из обширного ответа, полученного автором на его запрос от одной компании-изготовителя, следовало, что компания знает о неспособности газовых разрядников обеспечить защиту от ЭМИ, но считает, что

Таблица 1. Важнейшие параметры защитных элементов различных видов

Параметр/Вид и тип защитного элемента	Газовые разрядники	Варисторы	Тиристорные супрессоры	Диодные супрессоры
Тип элемента, лучшего в своем классе	2020-15T	V05E11P	TISP4011H1BJ	S03-6
Максимальное рабочее напряжение, В	—	11	5,25	6
Напряжение срабатывания, В	60 (500 В имп.)	18	10,5	6,8
Остаточное напряжение, В	52	36	3	15
Максимальная импульсная мощность, Вт	—	—	—	2800
Максимальный импульсный ток, А (2/10 мкс)	4000	500	500	150
Время реакции (быстродействие)	—	—	—	—
Емкость между электродами для варианта с минимальным напряжением срабатывания, пФ	2	1300	110	25

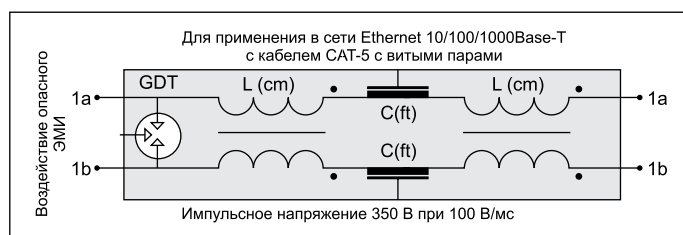


Рис. 2. Электрическая схема устройства защиты сети Ethernet от импульса ЭМИ на базе газового разрядника (GDT), рекламируемого компанией MPE

**Таблица 2.** Максимально допустимые значения емкости защитных элементов

Тип сигнала	Максимальная скорость передачи данных	Рекомендуемое максимальное значение емкости защитного устройства, пФ
E1A-232	19,6 кбит/с	50
E1A-422	10 Мбит/с	5
E1A-423	100 кбит/с	50
E1A-485	5 Мбит/с	25
E1	2,048 Мбит/с	25
USB	12,5 Мбит/с	5
Телеком-модем	60 кбит/с / 1,5 Мбит/с	25

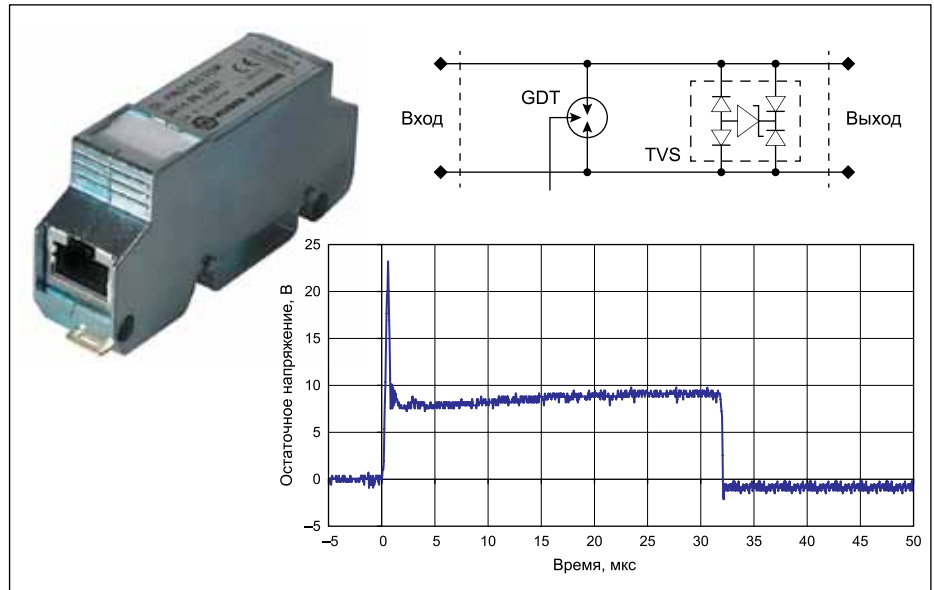
использовать такое несовершенное защитное устройство все же лучше, чем не использовать вообще ничего. Этот пример наглядно показывает, что нельзя полагаться лишь на рекламные проспекты производителей, а необходимо тщательно анализировать внутреннюю структуру предлагаемого защитного устройства и применяемую элементную базу.

Широко распространенные в электротехнике варисторы также не считаются подходящими для систем телекоммуникации защитными элементами, но уже по другой причине — из-за их высокой емкости (для низковольтных элементов). Значительная емкость, включенная в высокочастотные цепи телекоммуникационных систем, существенно искажает и ослабляет полезный сигнал, а потому использование в этих системах защитных элементов с высокой емкостью недопустимо. В таблице 2 приведены рекомендованные в [5] максимальные допустимые значения емкости для различных сигналов.

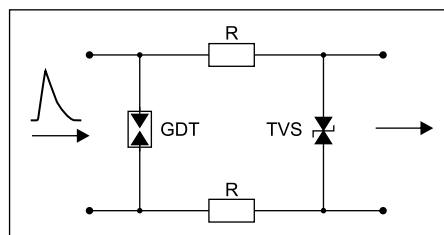
С точки зрения минимальной емкости (минимального воздействия на защищаемую цепь) наилучшими показателями обладают газовые разрядники. Эта их особенность в сочетании с очень высокой коммутационной способностью (токи разряда могут достигать единиц и даже десятков килоампер) не позволяет разработчикам защитной аппаратуры полностью сбрасывать их со счетов и заставляет искать возможные обходные пути их применения для защиты телекоммуникационного оборудования.

И такой путь, по мнению многочисленных производителей защитных устройств, найден. Идея заключалась в комбинации сильнооточного, но медленного газового разрядника с быстрым, хотя и слаботочным диодным супрессором (рис. 3).

Однако такое техническое решение вызывает некоторое недоумение. Хорошо известно, что диодные супрессоры (TVS-diode на схеме) срабатывают (переходят в проводящее состояние при воздействии импульса повышенного напряжения) намного быстрее, чем газовые разрядники (GDT на схеме). Но после срабатывания супрессора газовый разрядник никогда не сработает из-за низкого остаточного напряжения на открытом диодном супрессоре, недостаточном для пробоя газа в газовом разряднике (минимальное напряжение пробоя составляет около 60 [4]).



**Рис. 3.** Внешний вид, электрическая схема одного канала и осциллограмма срабатывания защитного устройства серии 3414 фирмы HUBER+SUHNER [6]

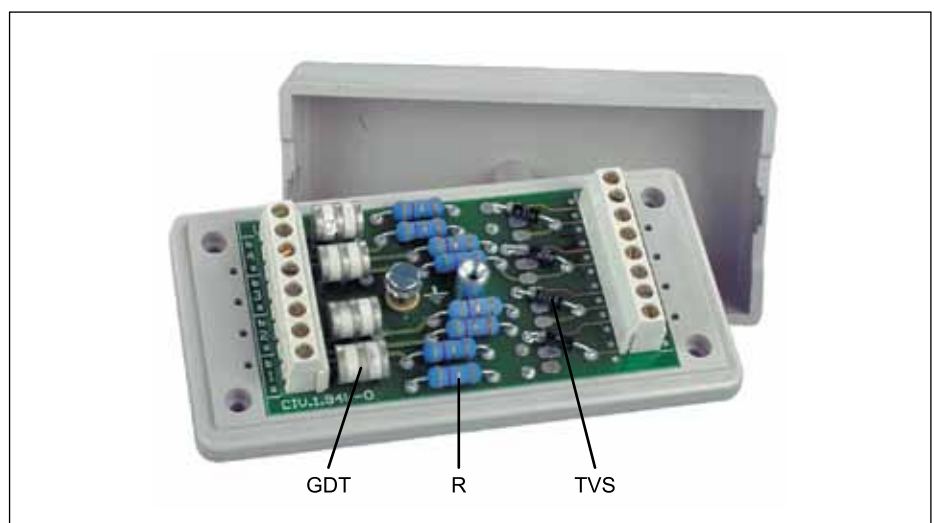


**Рис. 4.** Схема комбинированного двухкаскадного защитного устройства с дополнительными резисторами R

Отсутствие в этом устройстве условия для срабатывания газового разрядника подтверждается и осциллограммой, из которой хорошо видно, что напряжение в данной схеме никогда не достигает минимального напряжения пробоя газового разрядника.

Эту проблему попытались решить путем введения в схему дополнительных резисторов (рис. 4).

По замыслу разработчиков этого технического решения, при поступлении на вход устройства импульса высокого напряжения с высокой крутизной переднего фронта первым срабатывает диодный супрессор TVS и ограничивает амплитуду напряжения на защищаемом устройстве. При этом ток, проходящий через него, создает падение напряжения на резисторах R. Суммарное падение напряжение на последовательно соединенных резисторах и супрессоре должно быть достаточным для пробоя газового разрядника GDT, который после срабатывания должен зашунтировать вход устройства и разгрузить по току супрессор. Соответственно, по замыслу разработчиков, в таком защит-



**Рис. 5.** Пример комбинированного двухкаскадного защитного устройства по схеме рис. 3, выпускаемого промышленностью. GDT — газовые разрядники; R — резисторы; TVS — диодные супрессоры

ном устройстве должны сочетаться положительные качества супрессора (высокое быстродействие) с высокой коммутационной способностью газового разрядника, при том, что суммарная емкость устройства остается достаточно низкой. Данная схема нашла широкое применение во многих типах защитных устройств, выпускаемых различными фирмами (рис. 5).

Аналогичные схемы с первым каскадом на газовом разряднике (иногда с различными принципиальными изменениями и дополнениями) используются во многих защитных устройствах, рекламируемых как специальные устройства для защиты от ЭМИ ЯВ, например, в устройствах фирмы Meteorlab и многих других. Однако при более глубоком анализе ситуации становится очевидной бесперспективность такого технического решения для защиты от ЭМИ. Это связано с очень малой длительностью импульса ЭМИ (до нескольких десятков наносекунд). Столь короткий импульс просто закончится прежде, чем сработает газовый разрядник. Поэтому он никакой роли не играет и его наличие или отсутствие никак не скажется на работе защитного устройства.

Некоторые производители вместо резисторов в схеме рис. 3 используют дроссели, чтобы затянуть процесс нарастания напряжения на супрессоре, приблизить момент его срабатывания к моменту возникновения разряда в газовом разряднике и тем самым ограничить время протекания большого тока через супрессор. Амплитуда тока через супрессор тоже будет ограничиваться этими дросселями, обладающих высоким импедансом для короткого импульса. Проблема, однако, в том, что дроссели будут вносить существенное затухание и в полезный высокочастотный сигнал, лежащий в мегагерцовом диапазоне, и, значит, эта идея не слишком хороша для телекоммуникационной аппаратуры.

Другая проблема, а точнее парадокс, заключается в том, что всевозможные меры защиты оборудования, ослабляющие степень воздействия на него ЭМИ ЯВ, приведут к уменьшению амплитуды импульса тока ЭМИ. Довольно длинные кабели с жилами малого сечения, используемые в системе телекоммуникаций (то есть с относительно высоким импедансом), могут дополнительно ограничивать амплитуду тока ЭМИ. А при недостаточно большой амплитуде тока через супрессор и низкоомные резисторы R (с сопротивлением в несколько ом), падение напряжения на них может не достигнуть требуемого для пробоя газового разрядника напряжения 650–700 В и выше (при большой скорости нарастания приложенного к разряднику напряжения), в то время как через супрессор пройдет более широкий (из-за влияния индуктивности дросселей) импульс тока, способный вызвать тепловую перегрузку внутренней структуры супрессора и его разрушение.

К сожалению, все эти рассуждения не могут быть ни подтверждены, ни опровергнуты расчетами в связи с отсутствием реальных исходных данных об импульсе ЭМИ (в каждом конкретном случае и в каждом конкретном месте расположения оборудования, степени его защиты и т. д.) и о параметрах каждой медной пары многожильного кабеля системы телекоммуникаций, проходящей через различные промежуточные соединения. Однако сама по себе вероятность непредсказуемого поведения достаточно дорогих устройств, широко рекламируемых как надежные и проверенные в соответствии со стандартами MIL-STD-188-125, MIL-STD-461F средства защиты, должна настораживать специалистов. Вместе с тем возникает вполне уместный вопрос о том, как же эти устройства прошли испытания на соответствие указанным стандартам, если из приведенных выше рассуждений следует, что они не будут работать так, как это предполагается производителями. При более глубоком анализе ситуации оказывается, что и здесь нас ожидает подвох. Выясняется, производители испытывают эти устройства не импульсом ЭМИ ЯВ 20/500 нс, как предписано (импульс напряжения ЭМИ ЯВ еще короче и круче — 2/50 нс), а стандартным грозовым импульсом 8/20 мс, то есть значительно более пологим и длительным импульсом. В свое оправдание производители говорят [7], что смоделировать импульс ЭМИ ЯВ слишком сложно и для этого требуется специальная дорогостоящая аппаратура, а генераторы стандартного грозового импульса широко представлены на рынке и их использование не представляет проблем. Вместе с тем, поскольку грозовой импульс намного шире импульса ЭМИ ЯВ, его энергия даже больше импульса ЭМИ и он еще больше нагружает защитное устройство. Далее рассуждают [7] так: если устройство выдержало проверку более мощным грозовым импульсом, оно наверняка выдержит и короткий импульс ЭМИ ЯВ. При этом апологеты подобного метода испытаний почему-то стыдливо умалчивают о том, что поведение газового разрядника при воздействии длинного и короткого импульсов будет совершенно разным. Если газовые разрядники надежно срабатывают при воздействии достаточно длинного грозового

импульса с относительно пологим передним фронтом, то при воздействии значительно более короткого и со значительно более крутым (на несколько порядков!) передним фронтом импульса ЭМИ ЯВ они просто не успеют сработать, во-первых, из-за своей естественной «медлительности», а во-вторых, из-за резкого возрастания электрической прочности газа, наполняющего разрядник и, соответственно, резкого повышения его напряжения пробоя.

Выходом из сложившейся ситуации может стать, по нашему мнению, использование простых, очень дешевых, одноразовых, но действующих предсказуемо защитных устройств на основе диодных супрессоров, обладающих набором всех необходимых для эффективной защиты систем телекоммуникаций параметров — быстродействием, малой емкостью, низким напряжением срабатывания. При воздействии ЭМИ внутренняя структура супрессора в таком защитном устройстве будет пробита под влиянием проходящего через него импульса тока, а защищаемая им цепь зашунтирована (закорочена). Принимая во внимание, что речь идет об исключительно чрезвычайном событии и о защите оборудования от одиночного не повторяющегося импульса, такой алгоритм работы защитного устройства можно признать вполне приемлемым, поскольку он спасет аппаратуру от повреждения импульсом ЭМИ и позволит очень быстро вернуть ее полную работоспособность, просто отключив поврежденное защитное устройство во время неизбежных восстановительных работ, которые обязательно будут проведены после такого события, как ЭМИ ЯВ.

Единственная техническая проблема — обеспечение избирательного действия такого защитного устройства, при котором его пробой должен наступать лишь при воздействии ЭМИ и не наступать при воздействии других, более слабых повторяющихся импульсных помех.

Такая избирательность может быть обеспечена, во-первых, выбором диодных супрессоров достаточно большой мощности, а во-вторых, ограничением тока, протекающего через него, с помощью резистора. Поведенный нами анализ параметров диодных супрессоров, имеющихся на рынке и об-

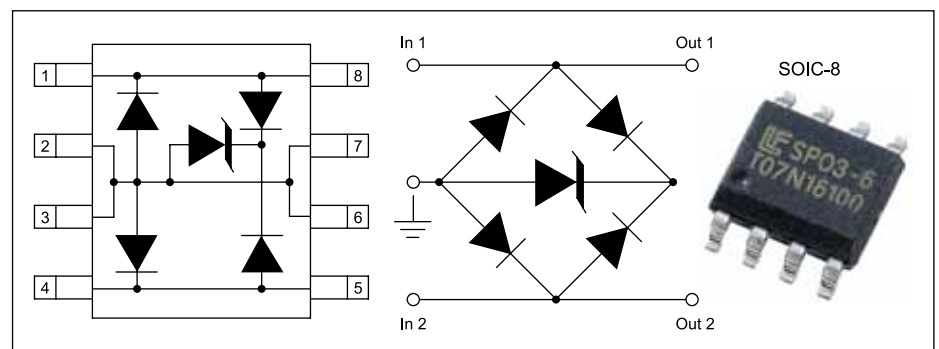
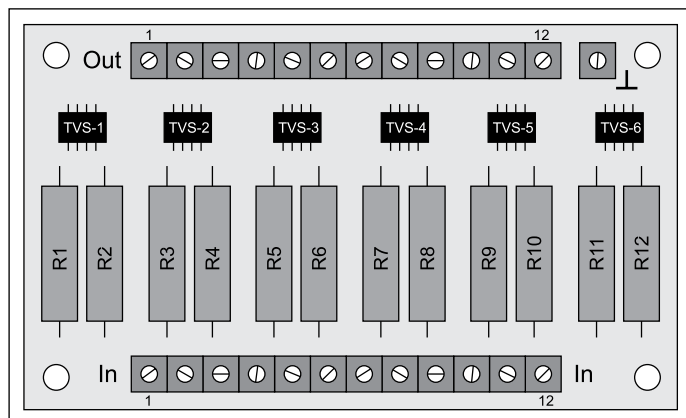


Рис. 6. Диодный супрессор типа SP03-6





**Рис. 7.** Чертеж печатной платы предлагаемого защитного устройства на шесть витых пар, содержащего диодные супрессоры и токоограничивающие резисторы. Плата должна быть покрыта высоковольтным лаком

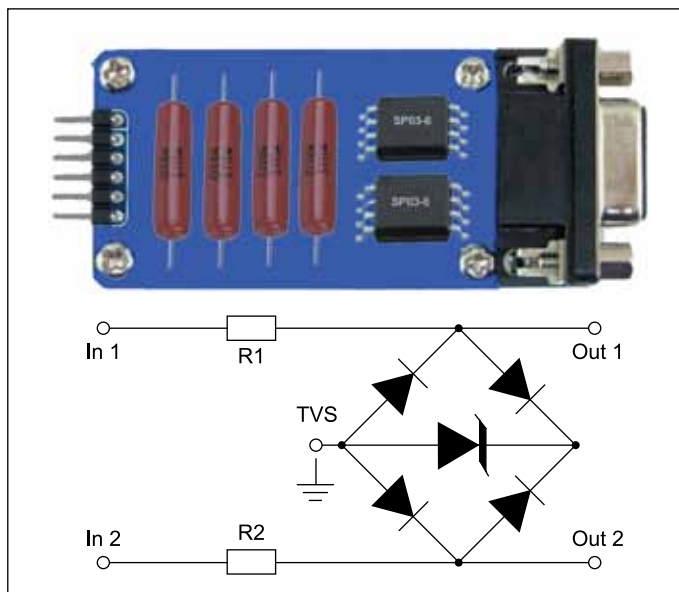
ладающих подходящими для работы в системах телекоммуникации напряжением срабатывания и емкостью, показал, что наиболее мощными из всех являются диодные супрессоры типа S03-6 (рис. 6), выпускаемые американской компанией Littelfuse, которые примерно в 4 раза мощнее диодных супрессоров других фирм с таким же рабочим напряжением и емкостью и допускают протекание импульсных токов до 150 А.

Одна такая микросхема обеспечивает защиту одной витой пары от ЭМИ как общего (относительно корпуса), так и дифференциального (между проводниками) типа. Стоимость одного элемента около \$2, а при закупке партии элементов — менее \$1.

Последовательно включенный с супрессором резистор (на схеме рис. 6 резистор включается последовательно с каждым входом) должен иметь сопротивление порядка 20 Ом, чтобы при воздействии на вход защитного устройства импульсных помех с амплитудой в несколько киловольт проходящий через супрессор импульс тока не превышал максимально допустимого для него значения. Токоограничивающие резисторы должны быть безиндуктивными и предназначенными для высоковольтных импульсных воздействий, например, типов AW, 234AS, RT818 и других.

Защитное устройство, выполненное по такому принципу, является очень простым по конструкции (рис. 7) и дешевым. Такой же принцип может быть использован и для защиты входов чувствительной аппаратуры, подключаемых через разъем (рис. 8).

Изготовление таких простейших устройств может быть заказано потребителем у любой компании, производящей печатные платы, причем по очень невысокой цене. Любая из десятков китайских компаний быстро изготовит нужное количество подобных устройств с отличным качеством и за минимальную цену. Последнее чрезвычайно важно для гражданских отраслей энергетики и промышлен-



**Рис. 8.** Пример выполнения простейшего защитного устройства на две витые пары (для сигнала E1) и схема одного канала (на одну пару) для цепей, подключаемых к аппаратуре через разъем

ности, поскольку именно большие денежные затраты на обеспечение защиты от ЭМИ ЯВ являются основным фактором, до сих пор сдерживающим практические меры по осуществлению такой защиты. ■

## Литература

1. Гуревич В. И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса. М.: Инфра-Инженерия, 2015.
2. Gurevich V. Facilities Ensuring Substation Direct Current Auxiliary Power System Survivability under Electromagnetic Pulse (HEMP). Part 1. Stationary Substations // International Journal of Electrical and Electronics Research (IJER). 2017. Vol. 5, Is. 3.
3. Гуревич В. И. Применение LC-фильтров для защиты оборудования от электромагнитного импульса: реальная необходимость или инерция мышления? // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
4. IEC 61643-311 Components for low-voltage surge protective devices. Part 311: Performance requirements and test circuits for gas discharge tubes (GDT), 2 Ed., 2013.
5. Clark M. Transient Voltage Protection Across High Data Rate & RF Lines. MicroNote 122, Microsemi Corp.
6. Catalog HUBER+SUHNER. Lightning Protection. 2016.
7. Nalhorczyk A. J. HEMP Filter Design to Meet MIL-STD-188-125 PCI Test Requirements. IEEE. 10-th International Conference Electromagnetic Interference & Compatibility, 26–27 Nov., 2008.