

Продолжение. Начало в № 12 '2014

## Проблемы тестирования микропроцессорных реле защиты на устойчивость к преднамеренным электромагнитным деструктивным воздействиям

Владимир ГУРЕВИЧ,  
к. т. н.

**В данной статье оцениваются результаты проведенных двумя американскими компаниями исследований микропроцессорных реле защиты на устойчивость к преднамеренным деструктивным электромагнитным воздействиям, рассматриваются особенности устройств релейной защиты, уточняется и дополняется методика их тестирования.**

### Введение

В предыдущей статье на эту тему [1] автором были подробно проанализированы нормативные документы, относящиеся к проблеме преднамеренных электромагнитных деструктивных воздействий (ПЭДВ) на микропроцессорные реле защиты (МУРЗ), обоснован выбор видов испытаний, сформулированы требования к параметрам испытательных воздействий, сделан обзор технических средств, обеспечивающих проведение этих экспериментов. Однако опыт общения автора с техническим персоналом, ответственным за обеспечение таких испытаний, показал, что изложенного в [1] материала оказалось недостаточно для правильного планирования и выполнения подобных экспериментов. Анализ результатов выполненных ранее испытаний показал, что применяемые методы, критерии качества функционирования и параметры испытательных воздействий не всегда бывают выбраны корректно, в результате полученные данные не позволяют однозначно судить об устойчивости МУРЗ к ПЭДВ. Все это потребовало дополнительного исследования вопроса и выработки расширенных рекомендаций.

### Использование критерия качества функционирования при испытаниях электронной аппаратуры на электромагнитную совместимость

Реакция испытуемого объекта (ИО) на электромагнитные воздействия (ЭВ) может быть различной. Например, объект может полностью выйти из строя из-за электрического пробоя электронных компонентов

или временно потерять работоспособность только на период воздействия импульса или электромагнитного поля. Еще один вариант — кратковременный сбой в работе программного обеспечения под действием приложенного к объекту импульсного напряжения, требующий (или не требующий) последующей перезагрузки внутренней программы ИО. Вариантов видов реакции испытуемого объекта на ЭВ может быть множество. Допустимый для данного типа ИО и для данного типа испытаний вид реакции на электромагнитные воздействия называется критерием качества функционирования (ККФ), являющимся важнейшим показателем при испытаниях на электромагнитную совместимость (ЭМС), поскольку от его правильного выбора зависит вывод о том, прошло данное устройство конкретное испытание успешно или нет. Однако в стандартах на ЭМС нет и не может быть методики правильного выбора этих критериев. Как правило, все ограничивается фразой типа: «Выбор степеней жесткости, критериев качества функционирования осуществляют лица, разрабатывающие, согласовывающие и утверждающие технические задания или технические условия» и таблицей, из которой можно выбрать тот или иной ККФ из трех-четырех, предлагаемых конкретным стандартом. Это и понятно, поскольку правильный выбор зависит от конкретного типа ИО и определенных режимов и условий его работы. Более того, для одного и того же типа ИО могут быть выбраны различные ККФ в зависимости от режима работы, схемы включения, назначения, по которому он используется, условий эксплуатации и т. д. А потому понимание специфических особенностей каждого конкретного ИО очень важно, ведь выбор

того или иного ККФ обуславливает решение, принятое по результатам испытания, о пригодности или непригодности данного объекта к эксплуатации в определенных условиях.

### Особенности использования критерия качества функционирования при испытаниях микропроцессорных устройств релейной защиты на устойчивость к ПЭДВ

Организацией NERC (North American Electric Reliability Council) по запросу специальной комиссии Конгресса США “Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack” составлен список энергетического оборудования, которое должно быть проверено на устойчивость к воздействию электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ). В этот список вошли, в частности, микропроцессорные устройства релейной защиты и устройства системы SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition — общее название программно-аппаратных комплексов различных типов, обеспечивающих сбор данных в режиме реального времени с многочисленных датчиков, обработку, архивирование, отображение и передачу информации об объектах мониторинга, а также передачу команд оператора на удаленные объекты — основа современной АСУ ТП подстанции). Компанией Metatech были проведены испытания МУРЗ типа SEL-311L (дифференциальная защита линий) и контроллера системы SCADA типа SEL-2032 (рис. 1) по ускоренной программе и только на устойчивость к составляющей E1 ЭМИ ЯВ.

Результаты испытаний представлены в отчете Meta-R-320 [2]. Как показано в этом от-

чете, в качестве ККФ при испытаниях МУРЗ и контроллера SCADA были выбраны оценка исправности функционирования и отсутствие повреждений после каждого испытания, связанного с подачей коротких (5/50 нс) высоковольтных импульсов с амплитудой до 8 кВ на различные входы устройств. Отмечается, что при подаче импульсов с амплитудой 3,2 кВ на последовательный порт, МУРЗ самопроизвольно выключалось, но потом возвращалось в нормальный режим работы. Некоторые другие порты (например, IRIG — Inter-Range Instrumentation Group time code — порт синхронизации времени) были повреждены уже при напряжении 600 В. В контроллере SCADA был поврежден модуль связи Ethernet при напряжении 1,2 кВ. В документе также сказано, что в качестве одного из дополнительных параметров ККФ было выбрано отсутствие искажений результатов осциллографирования токов и напряжений, приложенных к входам реле. Сообщается, что в процессе испытаний нарушений в записи обнаружено не было.

**Критика метода испытания МУРЗ, выполненного компанией Metatech**

1. По нашему мнению, использование ККФ, основанных на проверке исправности МУРЗ после воздействия на него помехи, является неправильным и не позволяет прийти к однозначному выводу об устойчивости МУРЗ к данной помехе. Связано это с тем, что МУРЗ обладает некоторыми специфическими особенностями по сравнению с системой SCADA, рассмотренными в [3, 4]. При всей важности и ответственности системы SCADA она предназначена, прежде всего, для автоматического сбора, обработки и отображения информации. Несмотря на то, что в состав системы входят так называемые Remote Terminal Units (RTU) — дистанционно управляемые исполнительные устройства, они не могут работать в автоматическом режиме и предназначены лишь для исполнения команд оператора с удаленного диспетчерского пункта. Большинство современных подстанций работают в автоматическом режиме, без человека. Ручное управление положением выключателей на таких подстанциях (то есть фактически управление конфигурацией электрической сети) осуществляется оператором с диспетчерского центра через систему SCADA, отличающуюся уязвимостью к воздействию ПЭДВ. Поэтому при воздействии ПЭДВ телеуправление подстанций с диспетчерского пункта с большой степенью вероятности будет потеряно и конфигурация электрической сети будет определяться лишь системой релейной защиты — единственной системой, способной автоматически влиять на положение выключателей. При этом МУРЗ, составляю-



**Рис. 1.** Подвергнутые испытаниям на устойчивость к ЭМИ ЯВ: а) МУРЗ типа SEL-311L; б) контроллер для системы SCADA типа SEL-2032 производства Schweitzer Engineering Laboratories (США)

щие основу современной релейной защиты, постоянно обмениваются между собой информацией и командами в автоматическом режиме по уязвимым к ПЭДВ каналам связи (в отличие от системы SCADA, в которой критические команды управления на выключатели поступают только по инициативе диспетчера). В случае неправильных действий автоматически функционирующей релейной защиты, в работу которой диспетчер уже не может вмешаться, в частности излишних срабатываний под действием ПЭДВ, электрическая сеть, а за ней и энергосистема в целом может быть полностью развалена. Это одна из причин, вследствие которой микропроцессорная релейная защита должна испытываться на воздействие ПЭДВ в процессе ее функционирования, а не проверяться на наличие повреждений после воздействия на нее помехи.

2. Пути проникновения в МУРЗ электромагнитной помехи в виде импульсов, подаваемых на защищенные в большинстве случаев входы, и высокочастотной электромагнитной волны, проникающей непосредственно на внутренние высокочувствительные электронные компоненты или через незащищенные входы/выходы электронных блоков, а также через многочисленные кабели, подключаемые к МУРЗ и выполняющие роль антенн, поглощающих электромагнитную энергию, — различны. Тем более что ПЭДВ не ограничиваются лишь ЭМИ ЯВ, а включают в себя также направленное ультраширокополостное высокочастотное излучение специальных источников мощностью в несколько гигаватт, предназначенных для дистанционного поражения электронной аппаратуры [4]. К сожалению, опасность представляет не только аппаратура, специально созданная для поражения электроники, но даже излучение обычных мощных радиа-

ров. Так, в 1999 году был официально зарегистрирован случай катастрофического отказа системы SCADA компании San Diego County Water Authority, обеспечивающей водоснабжение Сан-Диего, вызванного излучением корабельного радиолокатора, находящегося на расстоянии 25 миль от города. Аналогичный случай произошел в 1980-м в Голландии на газопроводе, расположенном в полутора километрах от порта Ден-Хелдер. Тогда повреждение системы SCADA портовым радаром привело к мощному взрыву газа. Поэтому испытания устойчивости МУРЗ к воздействию ПЭДВ не должно ограничиваться лишь подачей импульсов высокого напряжения на определенные входы, а сопровождаться также облучением ИО электромагнитным излучением с направленной антенны, как это и предусмотрено соответствующими стандартами [1].

3. Следует учитывать, что при возникновении ЭМИ ЯВ его воздействию будет подвергаться не только высокочувствительное электронное оборудование (МУРЗ, аппаратура системы SCADA), но и силовое электрооборудование энергосистемы: линейные изоляторы, трансформаторы, генераторы. Причем воздействовать на это оборудование будет не только составляющая E1 ЭИМ ЯВ (смоделированная в испытаниях [2]), но и две другие его составляющие — E2 и E3 [1]. Как известно из ранее выполненных исследований [2] в Советском Союзе и в США, в результате такого комплексного воздействия всех составляющих ЭМИ ЯВ очень велика вероятность повреждения силового высоковольтного оборудования — пробоя линейных изоляторов, насыщения и сгорания силовых трансформаторов, пробоя изоляции генераторов и т. п. То есть момент воздействия мощной электромагнитной помехи



Рис. 2. Испытание МУРЗ типа SEL-311 на воздействие ПЭДВ на испытательных стендах полигона Пикатинни армии США в Нью-Джерси

на МУРЗ совпадает по времени с моментом изменения внутреннего состояния элементов МУРЗ, связанного с появлением на его входах аварийных значений контролируемых токов и напряжений. Как поведет себя МУРЗ в таком режиме? Сможет ли релейная защита, подвергаясь воздействию ПЭДВ, своевременно отключить входящий в насыщение трансформатор, поврежденный участок воздушной линии, пробитый кабель? Не вызовут ли совместные неправильные действия различных МУРЗ полный развал и коллапс энергосистемы?

Проведенное в [2] испытание не дает ответов на эти вопросы. «Мы произвели системы столь усложненные, что уже не можем предусмотреть все возможные взаимодействия в ней, все возможные отказы. Мы добавляем в эти системы все новые устройства безопасности, но остаемся обманутыми и побежденными скрытыми связями в этих системах», — писал известный специалист по надежности и уязвимости сложных систем Чарльз Перроу [5]. Он называет эту проблему «непостижимостью», поскольку даже самый обычный несчастный случай инициирует взаимодействия, которые «не только неожиданны, но и непредсказуемы» для некоего критического промежутка времени. В большинстве несчастных случаев никто не ожидал, как одни «алгоритмы взаимодействия» затронут другие, таким образом, никто не мог заранее предполагать того, что случилось. Все это в полной мере относится к современной весьма сложной и разветвленной системе релейной защиты, чье поведение при воздействии ПЭДВ на энергосистему заранее предусмотреть невозможно.

### Анализ результатов второго независимого испытания МУРЗ того же типа

Еще об одном испытании МУРЗ того же типа (по странному совпадению) сообщается в рекламной презентации производителя этих устройств — компании Schweitzer Engineering Laboratories [6]. В документе приведены результаты, полученные по образ-

цам МУРЗ типа SEL-311 на стендах полигона Пикатинни армии США в Нью-Джерси при испытаниях на ЭМИ ЯВ и на электромагнитное излучение (рис. 2). В этой рекламной презентации утверждается, что все испытания прошли успешно. Вместе с тем при более тщательном анализе данного материала становятся заметны некоторые несуразности. Например, в приведенном на рис. 3 рекламном объявлении утверждается, что SEL-311 был испытан при напряженности поля в пределах от 25 до 1000 В/м, в то время как военный стандарт Mil-Std 461 требует всего лишь 50 В/м.

Довольно странную неосведомленность демонстрируют в этом документе специалисты такой серьезной компании, как SEL, если учесть, что в MIL-STD-461 напряженности полей, соответствующие ПЭДВ, рассматриваются не в вольтах, а в киловольтах и цифра «50» там упоминается не как 50 В/м, а как 50 кВ/м.

Еще большее недоумение вызывает столбчатая диаграмма, представленная на рис. 4, из которой видно, что на самом деле напряженность поля в 1000 В/м была использована при испытаниях лишь на частотах 1000–1500 МГц, а в остальном частотном диапазоне напряженность поля была чуть ли не вдвое меньше, а зависимость амплитуды от частоты не соответствует MIL-STD-461.

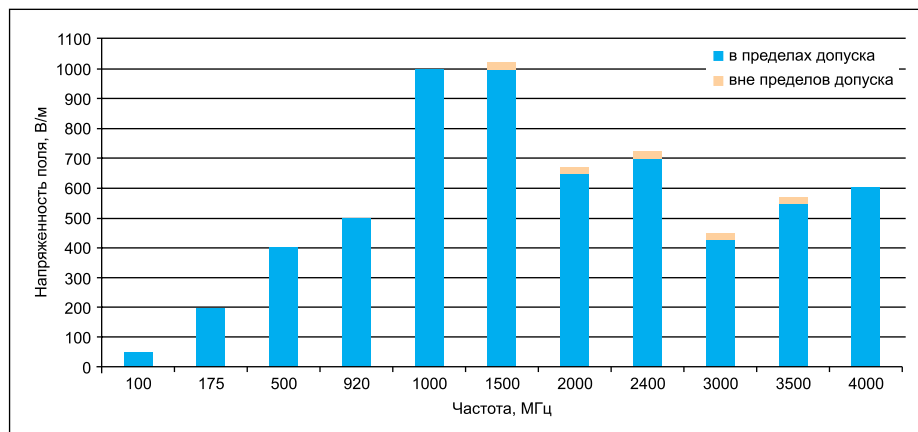


Рис. 4. Параметры электромагнитного излучения при испытаниях МУРЗ типа SEL-311

### SEL-311C Tested at US Army's Picatinny Arsenal in New Jersey

RF from 100 MHz to 4 GHz at power levels from 25 to 1000 volts per meter (Mil-Std 461 ask for 50V/m only)

Рис. 3. Текст из рекламного проспекта компании SEL

Как можно видеть из представленной диаграммы, уровни напряженности поля на ней ограничиваются началом нестабильности в функционировании реле (желтые области на верхушках столбцов). То есть на этой диаграмме представлена область стабильной работы отдельно установленного (вне системы релейной защиты) терминала типа SEL. Отсюда следует, что вне области значений, указанных на этой диаграмме, с ее чрезвычайно низкими значениями напряженностей электромагнитного поля, реле не обеспечивает стабильное функционирование.

Если сравнить ее с нормами упомянутого стандарта MIL-STD-461 (рис. 5), то можно заметить, что применявшиеся параметры испытательных воздействий даже близко не соотносятся с требованиями этого стандарта. Учитывая такую несуразность в выборе параметров испытаний на устойчивость SEL-311 к ПЭДВ, можно ли серьезно относиться к утверждению производителя этих реле об устойчивости его изделий к ПЭДВ?



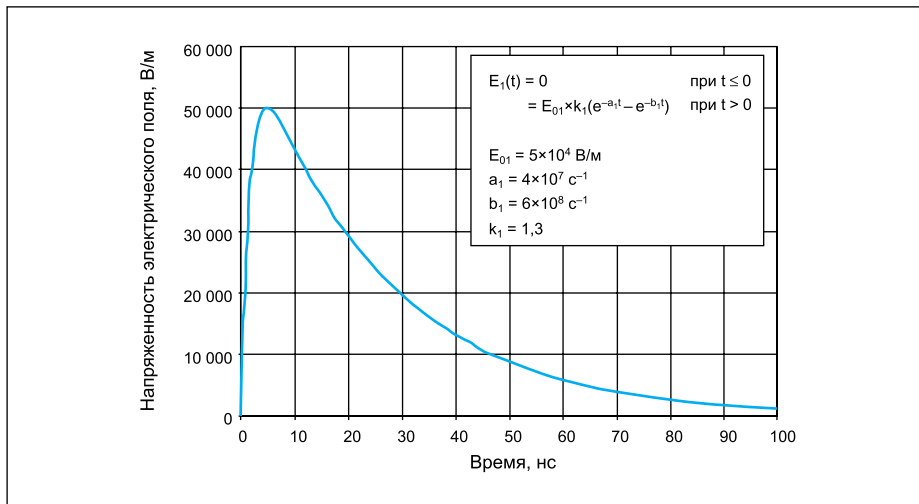


Рис. 5. График со стр. 138 стандарта MIL-STD-461F для сравнения с диаграммой, приведенной на рис. 4 (1 нс соответствует частоте в 1 ГГц)

Еще одна проблема связана с выбором в качестве ИО одиночного терминала МУРЗ. Подобные терминалы, как правило, выполняются в металлических корпусах, эффективно ослабляющих электромагнитное излучение, поэтому результаты испытаний на устойчивость к воздействию электромагнитного излучения на такой отдельно взятый терминал вполне ожидаемо могут быть положительными. В реальных условиях эксплуатации к МУРЗ подключены многочисленные кабели, выполняющие роль антенн, абсорбирующих электромагнитную энергию и доставляющих ее к внутренним элементам МУРЗ; многочисленные терминалы МУРЗ соединены между собой через соответствующую аппаратуру связи, подверженную влиянию ПЭДВ. Поэтому испытывать необходимо систему релейной защиты, причем в процессе ее функционирования, а не отдельно взятый терминал.

Примером правильного подхода к испытаниям сложных систем, к которым несомнен-

но относится и релейная защита, может служить испытание системы SCADA, описанное в [7] (рис. 6).

Таким образом, получается, что, имея результаты двух независимых испытаний одного и того же типа МУРЗ, проведенных двумя различными исполнителями, невозможно сделать никакое вывода о реальной его устойчивости к ПЭДВ. Кому же нужны такие испытания?

### Выводы и рекомендации

1. Из-за методических ошибок при испытаниях МУРЗ, проведенных ранее независимыми организациями, их нельзя признать удовлетворительными, а результаты значащими. В настоящее время нет достоверных данных о степени устойчивости МУРЗ к ПЭДВ, и поэтому такие испытания должны быть проведены повторно.
2. Виды и режимы испытаний МУРЗ должны быть выполнены в полном объеме и соот-



Рис. 6. Испытание системы SCADA на устойчивость к ЭМИ ЯВ (вверху видна антенная система симулятора ЭМИ, элементы системы SCADA расположены в отдельных боксах и соединены между собой стандартной системой связи)

ветствовать стандартам так, как это описано в [1].

3. В качестве ККФ должен быть выбран критерий, позволяющий контролировать функционирование МУРЗ в нормальном и аварийном режимах защищаемого объекта в процессе воздействия на него электромагнитной помехи, а не критерий, основанный лишь на проверке исправности терминала после окончания воздействия помехи.
4. Испытанию должен быть подвергнут как отдельный терминал МУРЗ, так и система устройств, включающих несколько МУРЗ, соединенных между собой кабелями длиной не менее нескольких метров через соответствующие устройства связи. При этом вся система должна быть подвергнута облучению электромагнитной энергией, а импульсным испытаниям приложенным напряжением отдельные терминалы и устройства связи или несколько объединенных терминалов и устройств связи одновременно.
5. При проведении испытания должно быть выбрано несколько ступеней по амплитуде испытательных импульсов и напряженности электрического поля — от минимального до максимального значения из приведенных в стандартах диапазонов. Полученные данные должны быть использованы при оценке устойчивости МУРЗ, смонтированных в конкретных шкафах и зданиях, обладающих определенным коэффициентом ослабления электромагнитного поля, а также при выработке требований по дальнейшему ослаблению этого поля, если окажется, что при существующих условиях не обеспечивается необходимая устойчивость МУРЗ к ПЭДВ. ■

### Литература

1. Гуревич В. И. Проблемы тестирования микропроцессорных реле защиты на устойчивость к преднамеренным электромагнитным деструктивным воздействиям // Компоненты и технологии. 2014. № 12.
2. Savage E., Gilbert J., Radasky W. The Early-Time (E1) High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and Its Impact on the U. S. Power Grid. Report Meta-R-320 for Oak Ridge National Laboratory, 2010.
3. Гуревич В. И. Проблемы стандартизации в релейной защите. СПб.: ДЕАН, 2015.
4. Гуревич В. И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты. Проблемы и решения. М.: Инфра-Инженерия, 2014.
5. Perrow C. Normal accidents. Living with high risk technologies. First ed. Princeton: Princeton University Press, 1984.
6. EMP Effects on Protection and Control Systems. Schweitzer Engineering Laboratories, 2014.
7. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack. April 2008.