

7. Sokolova M., Hulka L., Pietsch G.J. Influence of a Bias Voltage on the characteristics of Surface Discharge in Dry Air. – Plasma Process. Polym., 2005, 2, pp. 162–169.

8. Kiss E., Masuda S. On effect of D.C. bias voltage on ionic current and ozone production of surface discharge type ozoniser. – Journal of Electrostatics, 1989, 23, pp. 179–188.

9. Sokolova M.V., Perveyev A.I., Mitin A.N. *Sbornik materialov Vserossiiskoi konferentsii «Fizika nizkoterturnoi plazmy (ENTP-2014). T. 1* – in Russ. (Collection of materials of the All-Russian Conference «Low-Temperature Plasma Physics», vol. 1.) – Publ. Kazan National Research Technological University, 12014, pp. 140–144.

10. Lazukin A.V., Krivov S.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 2, pp. 4–11.

11. Nevogatkin S.V., Khasaya R.R., Khomich V.Yu., Yamshchikov V.A. *Prikladnaya fizika – in Russ. (Applied Physics)*, 2009, No. 4, pp. 111–117.

12. Mokshkunov S.I., Nebogatkin S.V., Rebrov I.Ye., Khomich V.Yu., Yamshchikov V.Ya. *Kvantovaya elektronika – in Russ. (Quantum Electronics)*, 2011, 41, No. 12, pp. 1093–1097.

13. Vereshagin I.P., Levitov V.I., Mirzabekyan G.Z., Pashin M.M. *Osnovy elektrogazodinamiki dispersnykh sistem (Fundamentals of electrogasdynamics disperse systems)*. Moscow, Publ. «Energiya», 1974, 480 p.

14. Tikhodeyev N.N. *Shurnal tekhnicheskoi fiziki – in Russ. (Journal of Technical Physics)*, 1955, vol. XXV, iss. 88, pp. 1449–1457.

[11.01.2017]

* * *

Электричество, 2017, № 5, с. 11–18

DOI:10.24160/0013-5380-2017-5-11-18

Особенности испытания электронного оборудования энергосистем на устойчивость к электромагнитному импульсу ядерного взрыва

ГУРЕВИЧ В.И.

Разрушительное воздействие электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) на электронное оборудование давно известно военным, и все оборудование военного назначения снабжено эффективной защитой от такого воздействия. Однако проблема в том, что разрушительному воздействию ЭМИ ЯВ подвержено не только военное оборудование, но вся электронная аппаратура, которой насыщена сегодня основа инфраструктуры страны – электроэнергетика. Защита электронного оборудования энергосистем от воздействия ЭМИ ЯВ, способного нарушить их нормальную работоспособность или полностью вывести из строя, приобрела в последнее время особую актуальность. Рассматриваются особенности испытаний электронного оборудования энергосистем на устойчивость к ЭМИ ЯВ, обсуждаются вопросы, связанные с выбором цели таких испытаний, методики испытаний и параметров тестовых импульсов.

Ключевые слова: электроэнергетика, оборудование, ядерный взрыв, электромагнитный импульс, защита

Способность оборудования нормально функционировать в условиях воздействия внешних электромагнитных помех называется электромагнитной совместимостью (ЭМС). Методика испытаний оборудования на ЭМС хорошо отработана и описана в многочисленных стандартах. Однако несмотря на то, что электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва, а точнее его составляющая E1, – это всего лишь одна из разновидностей электромагнитных помех, от которых должно быть защищено электронное оборудование энергосистем [1, 2], он имеет некоторые существенные отличия и особенности, требующие уточнения и корректировки известных методов испытания на ЭМС.

Несмотря на обилие отчетов и стандартов в области ЭМИ ЯВ [3], очень небольшое число посвящено рассмотрению методики испытаний устойчивости оборудования к этому воздействию [4, 5]. Учитывая сложность этих испытаний и полное отсутствие практического опыта в проведении таких испытаний у специалистов-энергетиков, указанных

двух публикаций явно недостаточно для проведения эффективных испытаний электронного оборудования энергосистем. А те единичные испытания, которые были проведены, в частности испытание микропроцессорного реле защиты типа SEL-311, вряд ли можно признать образцом для подражания вследствие многочисленных ошибок в методике испытаний и выборе параметров испытательных импульсов [6].

В связи с изложенным возникла необходимость в уточнении особенностей испытания электронного оборудования энергосистем на устойчивость к ЭМИ ЯВ.

Особенности ЭМИ ЯВ. К особенностям ЭМИ ЯВ, требующим учета при составлении программы испытаний, относятся:

1. Очень короткая длительность возмущающего воздействия (одиночный импульс длительностью в несколько наносекунд), в течение которого должен быть зафиксирован сбой в работе испытываемого оборудования (ИО). Поэтому число режимов рабо-

ты ИО, контролируемых в процессе испытаний, весьма ограничено. При испытании на устойчивость к ЭМИ ЯВ нельзя, например, изменять с помощью подключенного к ИО компьютера какие-то режимы работы ИО и наблюдать его реакцию на эти изменения, как это обычно делается при испытаниях на ЭМС в так называемой безэховой камере, когда ИО длительное время находится под воздействием электромагнитного излучения.

2. Опасность так называемых «мягких повреждений» (soft faults, soft failures, soft errors), особенно в элементах памяти электронного оборудования, которые далеко не всегда могут быть выявлены мгновенно в процессе испытаний. В аппаратуре, подвергнутой испытаниям, они могут проявиться лишь через значительное время после проведения испытаний, например при обращении к поврежденным участкам памяти для выполнения определенных операций или к определенным программным модулям.

3. Испытательный стенд ЭМИ ЯВ состоит, обычно, из бетонного основания с заложенной в него металлической сеткой, выполняющей роль одного электрода, и второй электрод — металлическая сетка, расположенная на высоте до 10–15 м над бетонным основанием (рис. 1). Между этими двумя электродами и прикладывается импульс высокого напряжения с выхода специального генератора (чаще всего — это генератор Маркса на основе набора высоковольтных конденсаторов и управляемых разрядников). Использовать сетку, заложенную в бетонное основание стенда и подключенную к генератору, в качестве системы заземления ИО, как правило, запрещается.

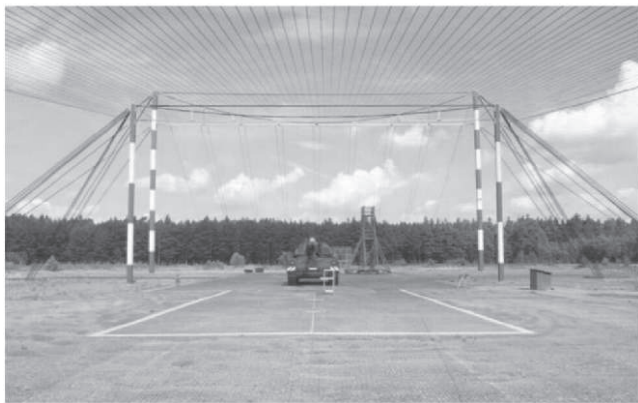
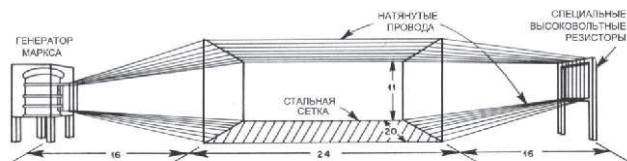


Рис. 1. Конструктивная схема и внешний вид испытательного стенда ЭМИ ЯВ

4. Высокая стоимость таких испытаний в связи с ограниченностью число испытательных центров и принадлежностью их к военным структурам.

5. Проблема организации правильной конфигурации ИО, поскольку в отличие от обычных электромагнитных помех ЭМИ ЯВ имеет глобальный, а не местный характер и воздействует не только на само ИО, а и на систему его электропитания, заземления, связи с другими объектами, т.е. в качестве ИО для испытаний должно быть выбрано не отдельно взятое устройство, блок, модуль, а система устройств, блоков, модулей, связанных между собой так же, как и в реальной обстановке, включая заземление в различных точках системы, расположенных на расстоянии друг от друга.

Цель испытаний. В связи со сложностью и высокой стоимостью проведения испытаний оборудования на стойкость к ЭМИ ЯВ очевидно, что таким испытаниям должны быть подвергнуты далеко не все виды оборудования, а лишь некоторые, нарушение работоспособности которых может привести к крупным авариям. С выбора видов оборудования для испытаний и должно начинаться составление плана испытаний. Следующим этапом должно стать четкое и понятное формулирование цели испытаний, поскольку от поставленной цели будет зависеть и выбор объекта испытаний, и методика испытаний. Возможные цели испытаний могут быть сформулированы следующим образом.

Испытание устойчивости существующего оборудования без каких бы то ни было средств защиты к максимально возможному воздействию ЭМИ. Целью этого испытания является выявление элементов, узлов и систем оборудования, чувствительных к ЭМИ и требующих защиты.

Испытание эффективности защиты оборудования с помощью *минимального набора* предварительно установленных средств защиты, предназначенных для действующих электроустановок к максимально возможному воздействию ЭМИ. В этом испытании может быть проверена эффективность применения минимального набора защитных средств, а также установлены виды и типы нарушений в работе оборудования, которые следует ожидать при воздействии ЭМИ.

Испытание эффективности защиты оборудования с помощью *полного набора* предварительно установленных средств защиты, предназначенных для вновь вводимых электроустановок от максимально возможного воздействия ЭМИ. Это испытание должно подтвердить эффективность наиболее сложного и наиболее дорогостоящего варианта защиты оборудования и оправдать средства, потраченные на системы защиты.

Испытание существующего оборудования без средств защиты серией импульсов с последовательно возрастающей амплитудой импульсов от 20% максимально возможного уровня до 100%. Целью испытания является, во-первых, поиск наиболее чувствительного к ЭМИ вида (или видов) оборудования, во-вторых, определение максимального значения амплитуды ЭМИ, выдерживаемого без повреждений самой аппаратурой, для последующего расчета требуемого уровня дополнительной защиты, дополняющей ослабление, вносимое самой аппаратурой, до максимального уровня, регламентированного стандартом.

Особенности методики испытаний. Поскольку, как отмечалось ранее, число режимов работы ИО, контролируемых в процессе испытаний, весьма ограничено, то в качестве таких режимов можно принять несанкционированное появление или наоборот, исчезновение сигналов на выходах как минимум двух ИО, объединенных системой связи в стационарном (ждущем) режиме, а также в режиме интенсивного обмена информацией (например в аварийном режиме). В последнем случае симуляция запуска аварийного режима должна быть синхронизирована с запуском тестового импульса.

В связи с опасностью наличия «мягких» повреждений в сложной микропроцессорной электронной аппаратуре после воздействия на нее испытательного импульса, даже в том случае, если в процессе тестирования не будет зафиксировано видимых повреждений или сбоев в ее работе непосредственно в процессе проверки, необходимо подвергнуть ее тщательной полной проверке на функционирование после проведения испытаний. В этой связи испытание с целью определения требуемого уровня дополнительной защиты должно сопровождаться тестированием на функционирование после каждого уровня воздействия ЭМИ.

Несомненно, это значительно усложняет испытание, так как после каждого импульса с более высокой амплитудой испытываемый объект должен быть подвергнут функциональному тестированию, а для этого к ИО после каждого цикла испытаний должны быть подключены тестовые системы. Упростить процесс испытаний можно, если использовать мобильные программируемые тестовые системы и заранее запрограммировать их для требуемого функционального тестирования. Такие системы выпускаются многими компаниями (DOBLE, ISA, Omicron, Megger и др.) и широко применяются в релейной защите.

Поскольку система заземления при воздействии на нее ЭМИ ЯВ играет роль огромной антенны, поглощающей электромагнитную энергию с большой площади и доставляющей ее прямо к за-

земленной электронной аппаратуре, необходимо включить в программу испытаний влияния системы заземления на два ИО, разнесенных в пространстве и подключенных к этой системе заземления в двух удаленных одна от другой точках. Поскольку конструкция испытательного стенда не предусматривает использования сетки, заложеной в бетонное основание в качестве системы заземления ИО, для испытаний должна быть смонтирована отдельная система заземления в виде сетки достаточной большой площади. Учитывая, что ЭМИ ЯВ имеет и вертикальную и горизонтальную составляющие, сетка заземления должна быть расположена не горизонтально на бетонном основании стенда, а под углом 30–45°. Возможно конструктивное выполнение этой большой сетки в виде отдельных секций, соединенных проводом между собой (рис. 2).

Электронные устройства энергосистем во многих случаях снабжены связью с другими электронными устройствами, датчиками, источниками электропитания, силовыми электрическими или электромеханическими аппаратами, образуя сложную систему. Так, например, построена система релейной защиты SCADA. Поэтому испытанию должна быть подвергнута система, а не отдельное устройство. В качестве релейной защиты могут быть использованы два шкафа с установленными в каждом из них микропроцессорным устройством

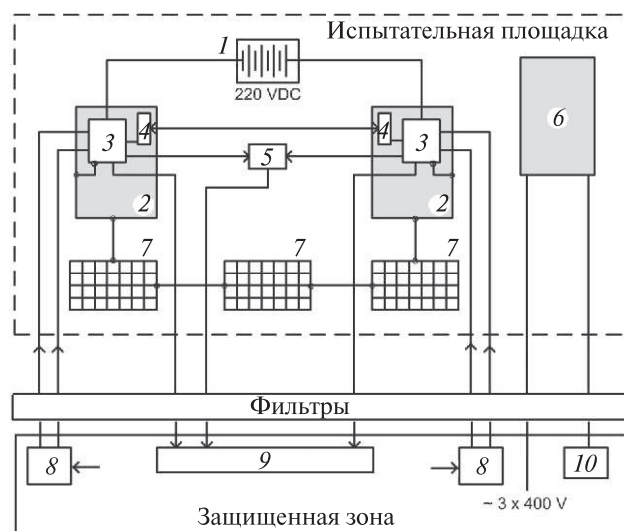


Рис. 2. Схема испытательного стенда: 1 – передвижная батарея 220 В; 2 – шкафы с электронной аппаратурой, расположенные на расстоянии друг от друга; 3 – испытываемые электронные устройства (в частности МУРЗ); 4 – устройства связи; 5 – исполнительное устройство (в частности электромеханическое реле), управляемое выходными цепями ИО; 6 – зарядно-подзарядный агрегат; 7 – набор металлических решеток, образующих модель системы заземления; 8 – симуляторы различных режимов работы испытываемых электронных устройств, синхронизированные с системой запуска ЭМИ; 9 – устройства регистрации состояния испытываемых объектов; 10 – нагрузка с устройством контроля выходного напряжения зарядно-подзарядного агрегата

релейной защиты (МУРЗ), аккумуляторная батарея, выполняющая роль источника питания, а также зарядно-подзарядный агрегат. Шкафы должны быть максимально разнесены в пространстве, соединены с сеткой заземления и снабжены системой связи между собой. Входы токов и напряжений МУРЗ должны быть подключены к управляемому источнику токов и напряжений, защищенному от воздействия на него испытательного импульса.

Такая защита обеспечивается размещением источника в защищенном отсеке и соединением его с ИО через специальный фильтр (coupling-decoupling circuit), обеспечивающий прохождение сигналов между ИО и аппаратурой, размещенной в защищенном отсеке, но блокирующий тестовый электромагнитный импульс. Этот источник должен быть снабжен дистанционным управлением для синхронизации его запуска с запуском тестового импульса. Также должен быть предусмотрен контроль состояния выходных цепей МУРЗ в процессе испытаний (см. рис. 2). Как правило, в стационарных испытательных стендах уже заложены специальные экранированные кабели и фильтры, предназначенные для передачи информации с ИО, находящегося на стенде, в защищенное экранированное помещение.

Как правило, электронное оборудование энергосистем расположено в металлических шкафах, а сами шкафы в кирпичных или бетонных зданиях, существенно ослабляющих воздействие ЭМИ ЯВ, в то время как другая часть оборудования: система заземления, датчики, измерительные трансформаторы тока и напряжения, многочисленные кабели, выходящие из здания, расположены на открытой местности. Это означает, что в реальных условиях различные элементы общей системы будут подвергнуты различным по интенсивности электромагнитным воздействиям.

Классическая конструкция излучающей антенны испытательного стенда (рис. 1) содержит в центральной части участок с фиксированным расстоянием между двумя параллельными сетками, а также два участка по краям с уменьшающимся расстоянием между верхней и нижней сетками. Такая конструкция дает возможность подвергнуть различные элементы испытуемой системы различным по интенсивности воздействиям от одного и того же тестового импульса, поскольку напряженность поля между верхней и нижней сетками очень сильно зависит от расстояния между ними. Расположив элементы испытуемой системы на различных участках испытательного стенда, можно получить условия испытания, максимально приближенные к реальным.

Еще одной особенностью ЭМИ ЯВ, которую следует учитывать при испытаниях, является наличие при реальном высотном ЯВ не только вертикальной составляющей электромагнитного поля, направленной от точки взрыва на большой высоте к земле, но и значительной горизонтальной составляющей этого поля. Поэтому при расположении элементов испытуемой системы между нижней и верхней сетками излучающей антенны испытательного стенда необходимо устанавливать их под определенным углом к поверхности земли с тем, чтобы обеспечить воздействие на них обеих этих составляющих.

При испытаниях должны быть предусмотрены средства фиксации изменения параметров ИО в процессе воздействия ЭМИ (расположенные, естественно, в защищенной зоне). В качестве таких средств могут быть использованы внешние самописцы, запоминающие импульсные осциллографы с автоматически запускаемым триггером, а также параллельно с этим и собственные встроенные в ИО регистраторы аварийных событий.

В зависимости от выбранной цели испытания система должна быть снабжена теми или иными средствами защиты: специальными фильтрами, ограничителями перенапряжений, экранированными кабелями и т.п., или не иметь никаких специальных средств защиты.

Виды испытаний и параметры испытательных импульсов. В соответствии со стандартом 61000-4-25 испытания на устойчивость электронной аппаратуры к ЭМИ ЯВ должны содержать два этапа: испытание на устойчивость к электромагнитным излучениям (ЭМИЗ) и к контактным импульсным воздействиям (КИВ). В свою очередь контактные импульсные воздействия подразделяются на два вида: импульсные напряжения, прикладываемые к входам аппаратуры, и импульсные токи, наводимые в протяженных проводах и кабелях.

Определение конкретных норм испытаний начинается с выбора одной из шести концепции испытаний. Стандарты 61000-2-11 и 61000-5-3 определяют эти концепции. Для ИО, расположенного в капитальных железобетонных или кирпичных зданиях, снабженных защитой от молний, без специальных защитных фильтров может быть выбрана концепция номер 2b. Этой концепцией предусматривается ослабление конструкцией здания уровня ЭМИЗ на 20 дБ в полосе частот 100 кГц — 30 МГц. Для выбранной концепции и компонента E1 напряженность электрического поля излучения, воздействующего на испытуемый объект, устанавливается 5 кВ/м (уровень R4), напряженность магнитного поля 13,3 А/м.

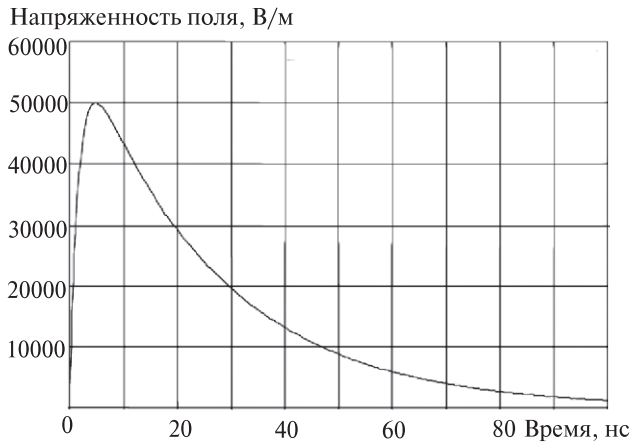


Рис. 3. Форма компонента ЭМИЗ в соответствии со стандартами IEC 61000-2-9, IEC 61000-2-10, IEC 61000-2-11 и MIL-STD-461F

Для сравнения: для деревянных зданий, не ослабляющих ЭМИЗ, напряженность электрического поля составляет 50 кВ/м (уровень R7). Для той же концепции и компонента E2 напряженность электрического поля устанавливается 10 В/м и магнитного поля 0,08 А/м. Параметры импульса ЭМИЗ описаны в стандартах 61000-2-9, 61000-2-10, 61000-2-11, MIL-STD-461F: время нарастания импульса (передний фронт) 2,5 нс, ширина импульса 25 нс, форма импульса соответствует приведенному на рис. 6.

Крупные испытательные стенды, обеспечивающие генерацию ЭМИЗ с требуемыми параметрами, имеются во многих странах. Например, в США таких стендов несколько (TORUS, ALECS, ARES, WSMR, ATLAS, VPBW и др.), в России таких стендов три:

комплекс «Аллюр» ФГУП ВЭИ им. Ленина в г. Истра Московской обл. (рис. 4);

испытательный центр ФГУ «12 ЦНИИ МО РФ» в Сергиевом Посаде;

испытательный комплекс «26 Центрального научно-исследовательского института» МО РФ в С.Петербурге.

Имеются подобные стенды также во Франции, Германии, Швеции, Швейцарии, Италии, Израиле,



Рис. 4. Стационарный имитатор ЭМИ ЯВ «Аллюр»; габариты имитатора: 100×35×13,5 м; рабочий объем: 10×10×10 м; форма импульса 2,5/25 нс; максимальная напряженность импульса электрического поля 70 кВ/м

ле, Голландии, Чехии, Польше, Украине, Китае, Японии.

На следующем этапе выбирается уровень испытательного воздействия для КИВ в соответствии со стандартом 61000-4-25. Для выбранной концепции номер 2b и наличии подключенных к рассматриваемому объекту не заглубленных в грунт проводов выбирается уровень испытательного воздействия E8 (для обеспечения нормальной 50%-й вероятности устойчивости объекта) или E9 (для 99%-й вероятности). Уровень E8 предполагает устойчивость испытуемого объекта к импульсному напряжению 8 кВ, а уровень E9 — 16 кВ. Вероятность 50% считается в стандарте нормальной и может применяться для гражданской аппаратуры.

Под испытательным импульсом напряжения КИВ подразумевается так называемый Electrical Fast Transient (EFT) — быстрый импульс, параметры которого (кроме амплитуды испытательного напряжения) и методика испытаний описаны в стандарте IEC 61000-4-4.

В таблице этого стандарта амплитуда испытательного напряжения для НЕМР (обозначен как «special») отмечена значком «X» и соответствует для него уровням E8 или E9.

Ранее генераторы EFT с требуемым уровнем выходного напряжения 8 кВ выпускались компаниями TESEQ, Kentech Instruments Ltd и Thermo

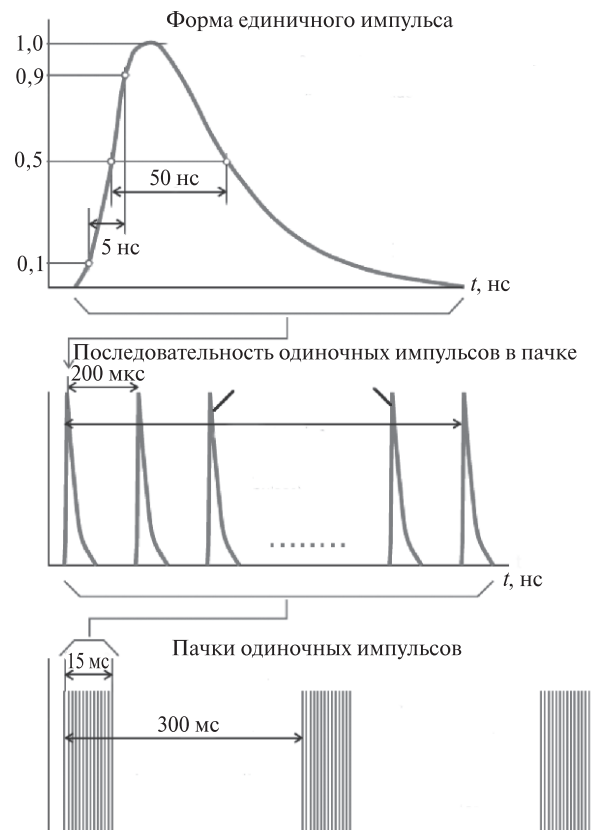


Рис. 5. Electrical Fast Transient (EFT) — быстрый импульс (IEC 61000-4-4)

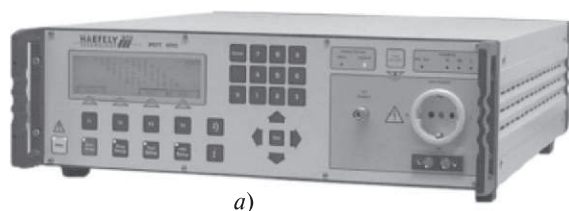
Тип EFT генератора	Производитель	Максимальная амплитуда выходного импульсного напряжения, кВ
PEFT 8010	Haefely EMC Technology	7,3
NSG 2025*	TESEQ	8,0
J0101031/3*	Kentech Instruments Ltd	8,0
KeyTek ECAT E421*	Thermo Electron Corp.	8,0
FNS-AX3-A16B	NoiseKen Laboratory Co.	4,8
EFT 500N8	EMTEST	7,0
TRA3000	EMC Partner	5,0
EFT 6501	Schaffner	4,4
EFT-4060B	Shanghai Yi Pai Electronmagnetic Techn.	6,6
EFT500	Suzhou 3Ctest Electronic Co.	5,0
AXOS8	Hipotronics	5,0

*Выпуск прекращен.

Electron Corp. (таблица) на основе вакуумного управляемого разрядника, формировавшего тестовые импульсы. С появлением мощных полупроводниковых коммутирующих элементов – IGBT-транзисторов – выпуск генераторов на вакуумных разрядниках был прекращен всеми тремя компаниями, поскольку импульсы, формируемые транзисторами, оказались намного более стабильными и «правильными», чем импульсы, формируемые вакуумным разрядником. К сожалению, одновременно с повышением стабильности генерируемых импульсов пришлось снизить их амплитуду.

Выполненный анализ показал, что в настоящее время ни один из выпускаемых на продажу генераторов EFT не удовлетворяет полностью требованиям стандартов по амплитуде импульса (8 кВ). Наиболее близким к требуемому значению амплитуды импульса обладает генератор типа PEFT 8010 (рис. 6).

Критерии качества функционирования. Допустимый для данного типа ИО и для данного типа испытаний вид реакции на электромагнитные воздействия во время и после испытания называется критерием качества функционирования (ККФ). Такими реакциями могут быть:



а)



б)

Рис. 6. Генератор EFT типа PEFT 8010 с максимальной амплитудой импульсов 7,3 кВ: а – вид на переднюю панель; б – вид задней панели

графические искажения на дисплее ИО, мигание или погасание экрана;

отображение на экране неверных данных;

искажение или потеря сигналов или данных;

нарушение функционирования или полная потеря каналов связи;

ложное срабатывание датчиков;

ложная активация систем;

резкое снижение способности систем к обработке и передаче информации, а также неправильное ее функционирование;

сбои в работе программного обеспечения;

зависание системы;

автоматическая перезагрузка компьютеризированной системы;

полный отказ функционирования системы вследствие повреждения источника питания или перегорания предохранителей в цепях питания;

физическое разрушение внутренних электронных компонентов ИО.

В базовом стандарте [4] (параграф 9) предложены лишь пять типов ККФ, обобщающих перечисленные выше реакции ИО:

А. Нормальное функционирование в соответствии с установленными нормами.

В. Временное ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции с последующим восстановлением нормального функционирования без вмешательства оператора.

С. Временное ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции, восстановление которых требует вмешательства оператора или перезагрузки системы.

Д. Ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции, которые не могут быть восстановлены оператором из-за потери данных или повреждения оборудования.

Е. Ухудшение качества функционирования, которое может повлечь за собой возникновение опасности для персонала, например, пожар.

При планировании испытаний должны быть заранее установлены критерии качества функционирования отдельно для каждого вида испытаний, по которым будет сделан вывод о том, выдержало или не выдержало ИО тот или иной вид испытаний. Для электронного оборудования энергосистем релевантными являются, очевидно, лишь критерии «А» и «В», и поэтому выбор должен быть сделан между ними.

Выводы. 1. В связи со сложностью и высокой стоимостью проведения испытаний оборудования на стойкость к ЭМИ ЯВ испытаниям должны быть подвергнуты лишь некоторые виды оборудования, нарушение работоспособности которых может привести к крупным авариям.

2. Планирование испытаний электронного оборудования энергосистем на устойчивость к ЭМИ ЯВ должно начинаться с четкого и понятного формулирования цели испытаний, которых может быть несколько.

3. Электронное оборудование энергосистем должно испытываться не в виде отдельных изделий, а в виде системы, включающей несколько электронных устройств (как минимум, двух), объединенных системой связи между ними, общей системой заземления, общим источником питания, источниками управляющих сигналов и т.п. При планировании испытания должны быть составлены функциональная схема такой системы и перечень необходимого оборудования, участвующего в испытаниях.

4. В зависимости от конкретного вида ИО должен быть заранее составлен перечень параметров, контролируемых в процессе воздействия ЭМИ, продумана методика контроля этих параметров и выбраны соответствующие виды аппаратуры для фиксации изменения этих параметров в процессе испытаний.

5. Воздействие ЭМИ на электронное оборудование может проявляться не только мгновенно в процессе испытаний, но иметь скрытые последствия. Поэтому помимо контроля состояния ИО в процессе испытаний необходима полная проверка функционирования ИО после завершения испыта-

ний на стенде-симуляторе ЭМИ ЯВ, а также после подачи на ИО тестового высоковольтного импульса контактным способом.

6. Для испытаний электронного оборудования энергосистем на устойчивость к ЭМИ ЯВ необходимы два типа воздействий, проводимых в дополнение к полному комплексу стандартных испытаний на электромагнитную совместимость:

импульсное электромагнитное излучение с длительностью фронта импульса 2 нс, шириной импульса 25 нс и с напряженностью поля 5–50 кВ/м;

быстрый импульс 5/50 нс (EFT) с амплитудой импульса 8 кВ, подаваемый контактным способом на входы ИО.

7. Среди возможных критериев качества функционирования для электронного оборудования энергосистем должны быть выбраны стандартные критерии «А» или «В».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич В.И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты: проблемы и решения. — М.: Инфра-Инженерия, 2014, 256 с.
2. Гуревич В.И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса. — М.: Инфра-Инженерия, 2016, 302 с.
3. Gurevich V.I. EMP and Its Impact on Electrical Power System: Standards and Reports. — Problems in Power, 2016.
4. IEC 61000-4-25 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-25: Testing and measurement techniques — HEMP immunity test methods for equipment and systems.
5. MIL-STD-461F Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, RS105, 2007.
6. Гуревич В.И. Проблемы тестирования микропроцессорных реле защиты на устойчивость к преднамеренным электромагнитным деструктивным воздействиям. — Компоненты и технологии, 2015, № 3, с. 158–161.

[01.08.2016]

А в т о р: Гуревич Владимир Игоревич окончил Харьковский институт механизации и электрификации с.х. по специальности «Электроснабжение с.х.» в 1978 г. В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию «Квазистатическая коммутирующая и регулирующая аппаратура с высокопотенциальной развязкой» в Харьковском политехническом институте. С 1994 г. постоянно проживает в Израиле. Зам. руководителя группы релейной защиты Центральной лаборатории Электрической компании Израиля.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 5, pp. 11–18

DOI:10.24160/0013-5380-2017-5-4-11-18

Peculiarities of Testing the Power System Electronic Equipment for Stability to a Nuclear Explosion Electromagnetic Impulse

GUREVICH Vlagimir I. (*The Electric Company Israel*) — Deputy Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

Devastating effect of the electromagnetic impulse generated by a high-altitude nuclear explosion (HANE) on electronic equipment is a well-known fact, and all military-purpose equipment is fitted with efficient protection from such impact. However, the electromagnetic impulse from a nuclear explosion has a devastating effect not only on military equipment, but also on all electronic devices that are at present