

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

Владимир ГУРЕВИЧ,  
к. т. н.

**Какое место в инфраструктуре страны занимает релейная защита энергосистем? Совершенно особое, поскольку именно через реле защиты, управляющие положением выключателей, можно получить доступ к дистанционному изменению конфигурации электрических сетей и нормально функционирующую энергосистему искусственно ввести в состояние коллапса.**

## Введение

Для релейной защиты предыдущего поколения, выполненной на электромеханической элементной базе, такой дистанционный доступ был просто невозможен. Как показали специально проведенные в США исследования, электромеханические реле защиты оказались устойчивыми даже к электромагнитному импульсу высотного ядерного взрыва [1]. Переход на микропроцессорные реле защиты (МУРЗ) обусловил резкое (на порядки) повышение уязвимости релейной защиты к деструктивным дистанционным воздействиям: кибернетическим и электромагнитным [2]. Сегодня это уже хорошо понятно организациям, занимающимся планированием стратегии возможных противостояний. Выполнением заказов этих организаций, направленных на создание специальных видов техники, поражающих высокочувствительную электронную аппаратуру современной электроэнергетики, заняты десятки крупнейших корпораций во всех развитых странах.

Несмотря на то, что новейшая доктрина армии США предполагает объединение преднамеренных кибернетических и электромагнитных деструктивных воздействий в единую систему Cyber Electromagnetic Activities (CEMA) [3], в данной статье мы рассмотрим лишь проблемы устойчивости МУРЗ к преднамеренным электромагнитным деструктивным воздействиям (ПЭДВ).

Если в середине прошлого века основным средством дистанционного поражения электронной аппаратуры был электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва, то уже к концу века появились специальные средства поражения электронной аппаратуры,

основанные на других принципах, подробно рассмотренных в [2].

Требования по устойчивости реле защиты (включая МУРЗ) к электромагнитным воздействиям изложены в стандартах Международной электротехнической комиссии (МЭК) серии 60255. Общие требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) к электронной аппаратуре — в стандартах МЭК серии 61000. Стандарты, идентичные серии МЭК 61000, используются и в РФ. К сожалению, все эти требования относятся к так называемым «непреднамеренным электромагнитным воздействиям», то есть к воздействиям (помехам) естественного происхождения. Электромагнитные же воздействия искусственного происхождения, специально предназначенные для поражения электронной аппаратуры (ПЭДВ), оказывают на нее значительно более сильные воздействия, чем предусмотренные обычными стандартами по ЭМС.

В связи со сложившейся ситуацией возникла необходимость решения четырех проблем:

1. Классифицировать типы ПЭДВ и обобщить их технические параметры.
2. Оценить параметры ПЭДВ, воздействующие на МУРЗ в реальных условиях эксплуатации.
3. На основе анализа существующих стандартов в области ПЭДВ сформулировать технические требования к оборудованию, необходимому для симуляции ПЭДВ и испытаниям МУРЗ на устойчивость к воздействию ПЭДВ.
4. Провести анализ рынка оборудования, предназначенного для испытания МУРЗ.

Данная статья посвящена рассмотрению перечисленных выше проблем.

## Классификация типов ПЭДВ

В англоязычной технической литературе преднамеренные электромагнитные деструктивные воздействия (ПЭДВ) называются High Power Electromagnetic Threats (НРЕМ) и подразделяются на два класса: высотный электромагнитный импульс ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) — High-Altitude Electromagnetic Pulse (НЕМР); и преднамеренно излучаемые электромагнитные помехи (ПИЭМ) — Intentional Electromagnetic Interference (ИЭМИ). ЭМИ ЯВ является результатом подрыва ядерного боеприпаса на высоте в десятки-сотни километров, а ПИЭМ производятся специально предназначенной для этого мощной электронной или электрофизической аппаратурой.

Как можно видеть на рис. 1, молния имеет намного большую спектральную плотность электромагнитного излучения, чем даже такой мощный источник излучения, как ядерный взрыв. Однако при этом следует иметь в виду, что вся энергия молнии сконцентрирована в так называемом ступенчатом лидере и имеет точечную зону поражения, в то время как ЭМИ ЯВ охватывает обширную поверхность земного шара (рис. 2).

Каждый из этих классов ПЭДВ делится, в свою очередь, на отдельные виды воздействий. ЭМИ ЯВ включает три различных вида воздействия, в соответствии с тремя составляющими электромагнитного импульса (рис. 3): E1 (early-time), E2 (intermediate-time), E3 (late-time).

Компонент E1 — самый «быстрый» и самый «короткий» (early-time) компонент ЭМИ ЯВ, обусловленный мощным потоком так называемых комптоновских электронов высокой энергии (являющихся продуктом

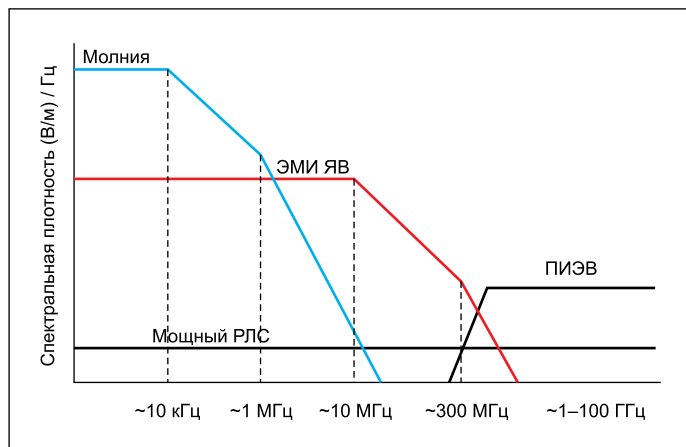


Рис. 1. Спектральная плотность излучения различных источников ПЭДВ в соответствии со стандартом IEC 61000-2-13

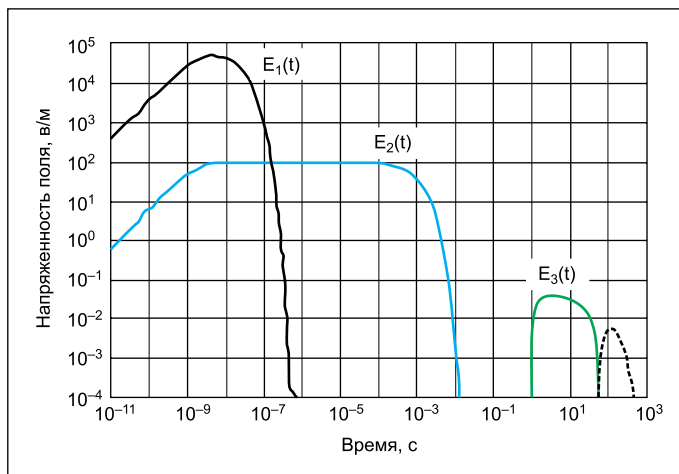


Рис. 3. Параметры компонентов высотного ядерного взрыва (IEC 61000-2-9)

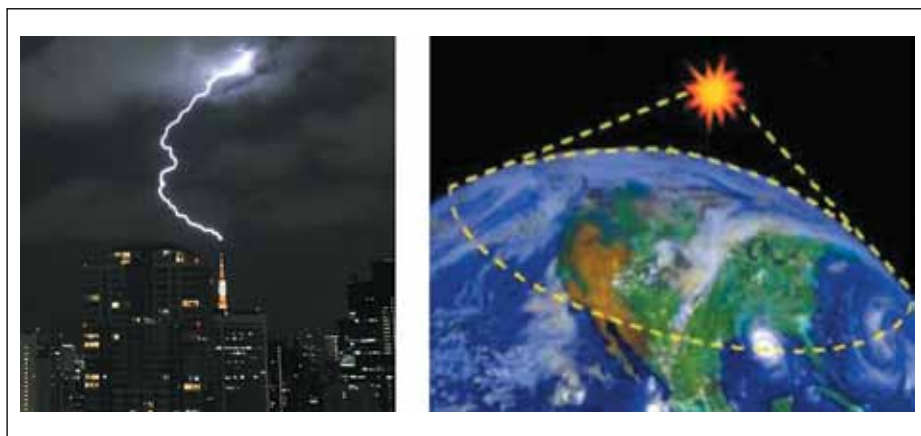


Рис. 2. Зона поражения молнии и ЭМИ ЯВ

взаимодействия  $\gamma$ -квантов мгновенного излучения ядерного взрыва с атомами газов воздуха), движущихся в магнитном поле Земли с околосветовой скоростью. Это взаимодействие очень быстро движущихся отрицательно заряженных электронов с магнитным полем производит импульс электромагнитной энергии, сконцентрированной магнитным полем Земли и направленной с высоты на Землю.

Амплитуда импульса обычно нарастает до своего пикового значения в течение 5 нс и падает вдвое в течение 200 нс. По определению МЭК, полная продолжительность импульса  $E_1$  может составлять около одной микросекунды (1000 наносекунд). Компонент  $E_1$  обусловлен самым интенсивным электромагнитным полем, вызывающим очень высокие напряжения в электрических цепях, он создает вблизи уровня земли на умеренно высоких широтах импульсные напряжения до 50 кВ/м при плотности мощности 6,6 МВт на квадратный метр. Компонентом  $E_1$  обусловлено большинство повреждений электронного оборудования, связанных с воздействием перенапряжений и электрическим пробоем  $p$ - $n$ -переходов полупроводниковых элементов и изоляции. Обычные разрядники, эф-

фективные для защиты от атмосферных перенапряжений, не всегда успевают сработать и защитить оборудование при воздействии компонента  $E_1$ , а рассеиваемая ими мощность далеко не всегда достаточна для поглощения энергии компонента  $E_1$  импульса, в результате чего обычные разрядники могут просто разрушиться.

Компонент  $E_2$  — это «промежуточный» (intermediate-time) по скорости нарастания и длительности компонент ЭМИ ЯВ, который, по определению МЭК, длится примерно от 100 мкс до 1 мс. Компонент  $E_2$  имеет много общего с электромагнитными импульсами атмосферного происхождения (близкой молнией). Напряженность поля может достигать 100 кВ/м. Из-за сходства параметров компонента  $E_2$  с молнией и хорошо отработанными технологиями защиты от молнии считается, что защита от компонента  $E_2$  не представляет проблемы. Однако при совместном воздействии компонентов  $E_1$  и  $E_2$  появляется проблема другого рода, когда под действием компонента  $E_1$  разрушаются защитные элементы, после чего компонент  $E_2$  беспрепятственно проникает в аппаратуру.

Компонент  $E_3$  очень отличается от двух других основных компонентов ЭМИ

ЯВ. Это очень «медленный» (late-time) импульс, длящийся десятки-сотни секунд, что обусловлено смещением и последующим восстановлением магнитного поля Земли. Компонент  $E_3$  имеет сходство с геомагнитной бурей, вызванной очень интенсивной солнечной вспышкой. Геомагнитные индуцированные токи — это токи, протекающие в земле, вызванные геомагнитными возмущениями в магнитосфере Земли. Эти токи наводятся и в протяженных металлических предметах, находящихся в земле, таких как трубопроводы, рельсы железных дорог, кабели. Напряженность индуцированного поля может достигать до 1 В/км.

Поскольку речь идет об испытаниях электронной аппаратуры, то в дальнейшем нас будет интересовать лишь компонент  $E_1$  как самый мощный и самый опасный для электронной аппаратуры.

ПИЭМ в свою очередь делится на два вида:

- Направленное узкополосное или широкополосное электромагнитное излучение (High Power Microwave). Такое излучение может исходить от:
  - работающих в непрерывном режиме на фиксированной частоте генераторов;
  - генераторов, излучающих пакеты высокочастотных импульсов, следующих с частотой от сотен герц до десятков килогерц (рис. 4);
  - генераторов, излучающих в ультрашироком диапазоне частот от десятков мегагерц до сотен гигагерц;
  - генераторов, излучающих затухающие по амплитуде высокочастотные сигналы (рис. 4);
  - импульсных генераторов с излучаемой пиковой мощностью от десятков мегаватт до единиц гигаватт. Эти генераторы создают очень короткие импульсы в наносекундном (единицы-десятки наносекунд) и субнаносекундном диапазоне (длительность импульсов десятки-сотни пикосекунд), следующие с частотой 0,1–10 кГц и более.

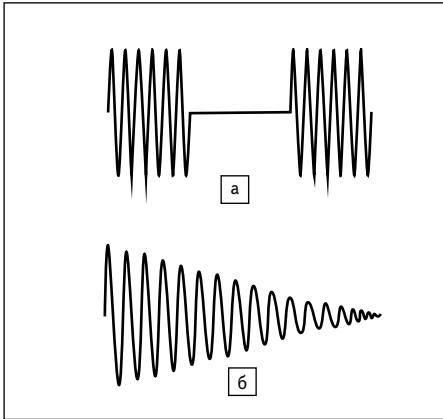


Рис. 4. Некоторые типы сигналов источников ПИЭМ:

а) пакчи высокочастотных импульсов одинаковой амплитуды;  
б) затухающие по амплитуде высокочастотные импульсы, повторяющиеся с частотой в несколько килогерц

- Импульсное электромагнитное излучение взрывных источников радиочастотного электромагнитного излучения (РЧЭМИ), большинство из которых основано на использовании ударно-волнового излучателя (УВИ), генерирующего мощный (1 ГВт) короткий импульс длительностью менее 1 нс с частотой полученного излучения — от сотен мегагерц до сотен гигагерц в одном импульсе.

В отличие от приведенной выше классификации, стандарт НАТО АЕСТР 250 Ed 2.0: 2011 Leaflet 257 — High Power Microwave делит ПИЭВ на четыре типа по другому принципу:

- Мобильный источник РЧЭМИ, направленный в сторону поражаемой цели и расположенный вне охраняемой территории цели, но способный подойти к ней на достаточно близкое расстояние для эффективного поражения.
- Портативный источник РЧЭМИ, который может быть доставлен непосредственно в защищаемую зону под одеждой человека или в виде портфеля и установлен в непосредственной близости от поражаемого объекта. Маломощный источник такого типа может быть намного опаснее, чем мощный удаленный источник РЧЭМИ, поскольку его излучение ничем не ослабляется.
- Контактный источник РЧЭМИ, инжектирующий энергию непосредственно в электрические провода и кабели, соединенные с поражаемой электронной аппаратурой, например в кабели связи. Такой источник может быть расположен как внутри, так и вне защищаемой зоны.
- Источник РЧЭМИ взрывного типа, выполненный в виде электромагнитной бомбы или снаряда, излучающий короткий электромагнитный импульс, проникающий в поражаемую аппаратуру через стены, окна, а также через провода и кабели, выходящие за пределы здания.



Рис. 5. Генератор ультраширокополосных импульсов с пиковой излучаемой мощностью 3,4 ГВт, разработанный ИСЭ СО РАН

Для перечисленных выше источников РЧЭМИ стандарт НАТО указывает максимальную излучаемую антенной мощность  $1 \text{ ГВт/м}^2$ , ограничиваемую электрической прочностью воздуха, равной 1 МВ/м. Следует отметить, что во многих других литературных источниках указывается иное значение для электрической прочности воздуха в нормальных климатических условиях: 2–3 МВ/м. Кроме того, даже в неоднородных электрических полях разрядное импульсное напряжение воздуха дополнительно повышается и превышает значение, нормируемое для переменного напряжения 50 Гц. Отношение амплитуды импульсного пробивного напряжения к напряжению при частоте 50 Гц называется коэффициентом импульса  $k_i$ . Для неоднородных электрических полей  $k_i = 1,1\text{--}1,3$ . Следует, однако, учитывать, что при пониженном давлении воздуха (в высокогорных районах) или при наличии в воздухе пыли и паров влаги (тумане) электрическая прочность воздуха может значительно снизиться. Снижение электрической прочности воздуха наблюдается также в процессе ионизации воздуха под действием высокочастотного разряда. Тем не менее в 2008 году в Институте силовоточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) был построен сверхширокополосный генератор импульсов (рис. 5) с выходной пиковой мощностью 3,4 ГВт, что намного превышает предельный уровень мощности излучения, указанный в стандарте НАТО. Этот генератор работает на напряжениях  $-205$  и  $+157$  кВ и генерирует импульсы длительностью около 1 нс при частоте следования импульсов 100 Гц.

А в лаборатории ВВС США, расположенной на авиабазе Киртланд (Albuquerque, New Mexico), еще в 1989 году был разработан РЧЭМИ с излучаемой мощностью 7,5 ГВт на основе так называемого «виркатора» (генератора с виртуальным катодом), работа-

ющего при напряжении 4 МВ и токе 80 кА [4]. С тех пор конструкцию виркатора удалось существенно усовершенствовать, повысить мощность до 40 ГВт, улучшить КПД. Это, в свою очередь, позволило смонтировать мощный направленный генератор РЧЭМИ на базе виркатора в головной части крылатой ракеты, которая по трассе своего полета способна сжигать всю наземную микроэлектронику и компьютерную технику, не имеющую специальной защиты. Секретный проект, начатый в 2008 году [5], недавно завершился полным успехом, о чем сообщили многие средства массовой информации, охарактеризовав этот успех как наступление новой эры в будущих войнах.

### Источники информации о параметрах ПЭДВ

Сегодня имеется большое количество стандартов, содержащих множество параметров ПЭДВ, норм и методов испытаний аппаратуры на устойчивость к ПЭДВ. Однако до настоящего времени стандарты Международной электротехнической комиссии в области ПЭДВ распространялись, в основном, лишь на ЭМИ ЯВ:

- IEC TR 61000-1-3 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 1-3: General — The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
- IEC 61000-1-5 High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems.
- IEC 61000-2-9 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2: Environment — Section 9: Description of HEMP environment — Radiated disturbance. Basic EMC publication.
- IEC 61000-2-10 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2-10: Environment — Description of HEMP environment — Conducted disturbance.
- IEC 61000-2-11 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2-11: Environment — Classification of HEMP environments.
- IEC 61000-2-13 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2-13: Environment — High-power electromagnetic (HPEM) environments — Radiated and conducted.
- IEC 61000-4-23 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-23: Testing and measurement techniques — Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.
- IEC 61000-4-24 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4: Testing and measurement techniques — Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance — Basic EMC Publication.
- IEC 61000-4-25 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-25: Testing and measurement techniques — HEMP immunity test methods for equipment and systems.
- IEC 61000-4-32 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-32: Testing and measurement techniques — High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium.

- IEC 61000-4-33 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-33: Testing and measurement techniques — Measurement methods for high-power transient parameters.
- IEC 61000-4-35 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-35: Testing and measurement techniques — HPEM simulator compendium.
- IEC 61000-4-36 Electromagnetic compatibility (EMC) — Testing and measurement techniques — IEMI Immunity Test Methods for Equipment and Systems.
- IEC/TR 61000-5-3 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-3: Installation and mitigation guidelines — HEMP protection concepts.
- IEC/TS 61000-5-4 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5: Installation and mitigation guidelines — Section 4: Immunity to HEMP — Specifications for protective devices against HEMP radiated disturbance. Basic EMC Publication.
- IEC 61000-5-5 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5: Installation and mitigation guidelines — Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance. Basic EMC Publication.
- IEC 61000-5-6 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-6: Installation and mitigation guidelines — Mitigation of external EM influences.
- IEC 61000-5-7 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-7: Installation and mitigation guidelines — Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code).
- IEC 61000-5-8 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-8: Installation and mitigation guidelines — HEMP protection methods for the distributed infrastructure.
- IEC 61000-5-9 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-9: Installation and mitigation guidelines — System-level susceptibility assessments for HEMP and HPEM.

Только в конце 2014 года ожидается публикация специального стандарта для ПИЭВ: IEC 61000-4-36 Electromagnetic compatibility (EMC) — Testing and measurement techniques — IEMI Immunity Test Methods for Equipment and Systems и стандарта IEEE P1642 — Recommended Practice for Protecting Public Accessible Computer Systems from Intentional EMI.

Имеется также большое количество и военных стандартов в области ПЭДВ для наземного оборудования:

- MIL-STD-2169B High — Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Environmental, 2012.
- MIL-STD-188-125-1 High — Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground Based C41 Facilities Performing Critical. Time-Urgent Mission. Part 1 Fixed Facilities, 2005.
- MIL-STD-188-125-2 High — Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground Based C41 Facilities Performing Critical. Time-Urgent Mission. Part 2 Transportable Systems, 1999.

- MIL-STD-461F Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, 2007.
- MIL-STD-464C Electromagnetic Environmental Effects. Requirements for Systems, 2010.
- Test Operations Procedure Report No. 01-2-620 High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Testing.
- MIL-STD-1377 Effectiveness of Cable, Connector, and Weapon Enclosure Shielding and Filters in Precluding Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance (HERO), 1971.
- MIL-HDBK-240 Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance (HERO) Test Guide, 2002.
- NATO AECTP-500 Ed. 4. Electromagnetic Environmental Effects Test and Verification, 2011.
- NATO AECTP-250 Ed.2 — Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions, 2011.

В России опубликовано в открытом доступе лишь несколько официальных документов в этой области:

- ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования.
- РД 45.083-99 Рекомендации по обеспечению стойкости аппаратурных комплексов объектов проводной электросвязи к воздействию дестабилизирующих факторов.
- ГОСТ Р 52863-2007 Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении: испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования.

Первые два документа относятся лишь к узкой области техники — системам связи и основаны на требованиях обычных, а не специальных стандартов по электромагнитной совместимости (ЭМС). Последний документ предназначен для более широкого применения, но также основан на требованиях общих стандартов по ЭМС. Все специальные требования (а это как раз требования по ПЭДВ) обозначены в этом стандарте знаком «Х» без указания технических параметров, что представляется несколько странным, учитывая название стандарта.

Имеются, естественно, и не публикуемые в открытом доступе материалы, например «Нормы по стойкости аппаратуры, приборов, устройств и оборудования ЕСС РФ к воздействию ИИ и ЭМИ ЯВ» — Решение ГКЭС при Минсвязи России № 143 от 31.01.96, а также и закрытые (в отличие от западных) военные стандарты. Хотя, как можно видеть из приведенного выше перечня стандартов, нормы стойкости и методы испытания аппаратуры к воздействию ЭМИ ЯВ уже давно не являются секретными и публикуются на Западе в открытом доступе, причем как стандарты МЭК общего пользования, так

и военные (за редким исключением, например MIL-STD-2169B). Вряд ли можно признать логичной и оправданной политику России в области чисто технической проблемы, в результате которой большинство российских специалистов во многих областях гражданской техники (например, в области электроэнергетики), так или иначе связанных с проблемами ПЭДВ, не имеют о них ни малейшего представления.

В последние годы в России был выполнен целый ряд диссертационных работ, посвященных этой тематике [6–9], правда, все они относятся к воздействию ПЭДВ на системы связи, но это не меняет существа вопроса.

### Параметры испытаний на устойчивость к ЭМИ ЯВ

В соответствии со стандартом 61000-4-25 испытания на устойчивость электронной аппаратуры к ЭМИ ЯВ должны содержать две составные части: 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 концепций испытаний. Стандарты 61000-2-11 и 61000-5-3 определяют эти концепции. Для МУРЗ, расположенных 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 от 100 кГц до 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. 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 приведенной на рис. 6.

На следующем этапе выбирают уровень испытательного воздействия для КИВ согласно стандарту 61000-4-25. Для выбранной концепции номер 2b и наличия подключенных к рассматриваемому объекту не заглубленных в грунт проводов выбирают уровень испытательного воздействия E8 (для обеспечения нормальной 50% вероятности устойчиво-

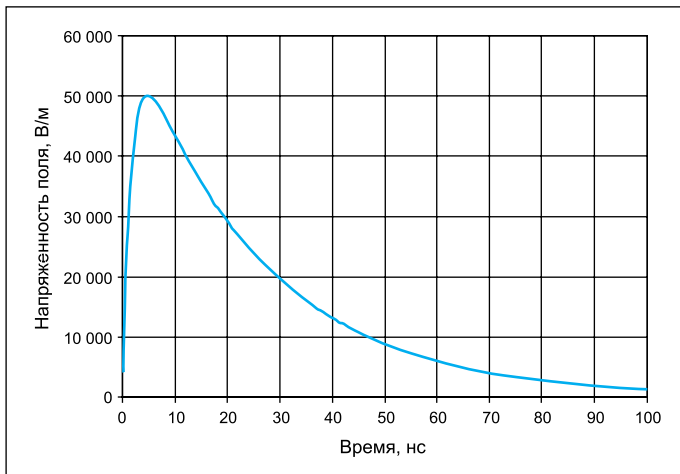


Рис. 6. Форма компонента ЭМИЗ в соответствии со стандартами IEC 61000-2-9, IEC 61000-2-10, IEC 61000-2-11 и MIL-STD-461F

Таблица. Максимальная амплитуда импульса 5/50 нс выходного напряжения генераторов EFT (IEC 61000-4-4), имеющихся на рынке

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

Примечание. \*выпуск прекращен.

сти объекта) или E9 (для 99% вероятности). Уровень E8 предполагает устойчивость испытываемого 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 (рис. 7).

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

### Параметры испытаний на устойчивость к ПИЭВ

Как отмечалось выше, стандарт МЭК (IEC 61000-4-36) с параметрами испытаний на устойчивость к ПИЭВ еще не опубликован, однако имеются другие стандарты и результаты исследований, характеризующие параметры ПИЭВ [6–18]. В настоящее время существует несколько принципиально различных методов генерации мощных РЧЭМИ, которые могут быть использованы для дистанционного поражения электронных и компьютерных систем, что обуславливает очень широкий диапазон параметров излучения:

- напряженность электрического поля в диапазоне от 1 до 100 кВ/м;
- длительность фронта импульса — от 100 до 500 пс;
- длительность импульса — от сотен пикосекунд до единиц наносекунд;
- частота повторения импульсов — от 0,1 до 1000 Гц.

Совершенно очевидно, что при наличии такого широкого разброса параметров разработанных источников очень сложно установить

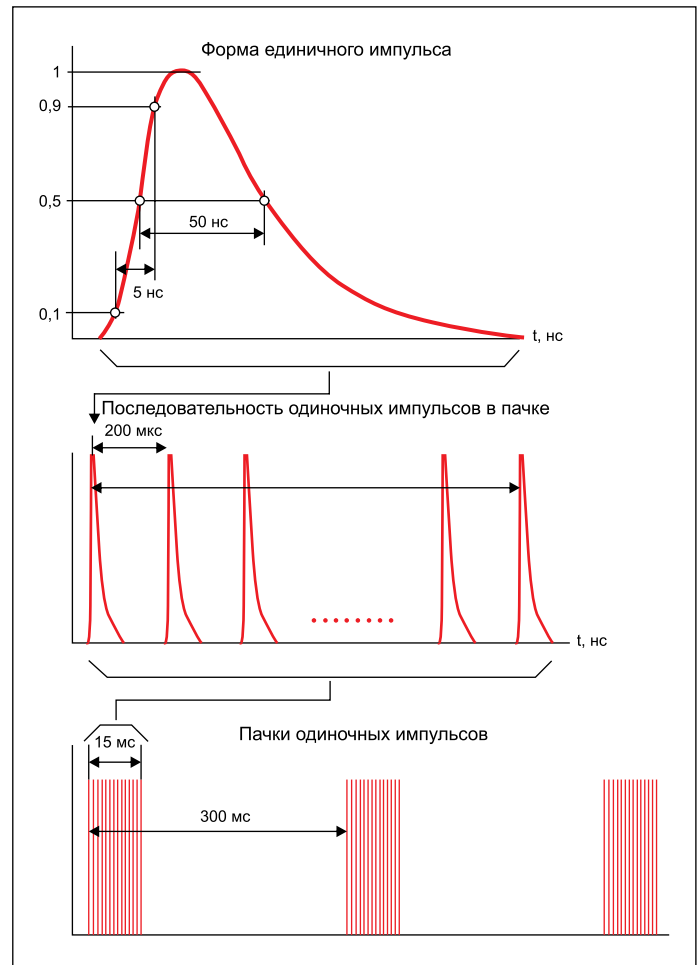


Рис. 7. Electrical Fast Transient (EFT) — быстрый импульс (IEC 61000-4-4)

какие-то четкие требования к испытаниям электронной аппаратуры на устойчивость к этим излучениям. Тем не менее на основе исследований, выполненных ведущим специалистом в этой области Вильямом Радаски (William Radasky), можно говорить о широкополосном импульсном излучении с длительностью фронта импульса 100 пс, шириной импульса 1 нс, частотой следования импульсов 1 МГц и напряженностью поля 10 кВ/м [10]. По имеющимся у автора сведениям, эти же параметры должны войти и в стандарт IEC 61000-4-36.

### Испытательное оборудование для тестирования на устойчивость к ПЭДВ

Разработкой источников мощных импульсов и РЧЭМИ занимается множество организаций во многих странах мира:

1. Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия).
2. Институт электрофизики УрО РАН (Россия).
3. Институт радиотехники и электроники РАН (Россия).
4. Институт прикладной физики РАН (Россия).
5. Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (Россия).
6. Московский радиотехнический институт РАН (Россия).
7. Институт высоких температур РАН (Россия).
8. СКБ НП УрО РАН (Россия).
9. СКБ НП СО РАН (Россия).
10. Московский государственный университет (Россия).
11. Уральский политехнический институт (Россия).
12. ПО «Томсктрансгаз» (Россия).
13. Научно-исследовательский институт полупроводников (Россия).
14. НПО «ЗЕНИТ» (Россия).



Рис. 8. Испытательный стенд для симуляции воздействия ЭМИ ЯВ на военную технику

15. НПО «БУРЕВЕСТНИК» (Россия).
16. Высоковольтный научно-исследовательский центр ВЭИ (ВНИЦ ВЭИ) (Россия).
17. Техасский технический университет (США).
18. Advanced Physics, Inc. (США).
19. Исследовательский центр GEC-Marconi (Великобритания).
20. Исследовательский центр ядерной физики SOREQ (Израиль).
21. Rafael Advanced Defense Systems (Израиль).
22. Исследовательский центр DSTO (Австралия).
23. Университет Стразклайд (Великобритания).
24. Институт физики (Эстония).
25. Исследовательский центр FOA (Швеция).
26. Северо-западный Институт ядерных технологий (Китай).
27. Исследовательская лаборатория RMA (Бельгия).
28. Исследовательский центр DSO (Сингапур).
29. Исследовательский центр Diehl Shtiftung (Германия).
30. Aviation University of Air-Force Changchun (Китай).
31. Electrostatic and Electromagnetic Protection Research Institute (Китай).
32. University of Electronic Science and Technology (Китай).
33. Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC (Китай).
34. North China Electric Power University (Китай).
35. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (Китай).
36. Nanjing Engineering Institute No.1 (Китай).
37. Jilin University (Китай).

Однако продукция большинства этих организаций предназначена для выполнения собственных исследований и не предназначена для продажи на рынке в качестве симуляторов ЭМИЗ или ПИЭВ для целей тестирования электронной аппаратуры. Большинство крупных производителей во-



Рис. 9. Стационарный имитатор ЭМИ ЯВ «Аллюр»



Рис. 10. Компактные стенды для испытания электронной аппаратуры на устойчивость к ЭМИЗ: а) Montena Technology; б) Applied Physical Electronics

енной техники имеют собственные стенды для испытаний образцов производимой ими продукции (рис. 8), также не предназначенные для продажи.

Подобными стендами обладают производители военной техники в Канаде, Китае, Франции, Германии, Индии, Израиле, Италии, Голландии, России, Швеции, Украине, Великобритании и США. Некоторые из них подробно описаны в стандарте [IEC/TR 61000-4-32]. Во многих странах имеются также специализированные испытательные лаборатории, принимающие заказы на проведение таких испытаний от сторонних организаций. В России это, например, испытательный комплекс «Аллюр» Высоковольтного научно-исследовательского центра ВЭИ в г. Истре Московской обл. (рис. 9). 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.

Однако компаний, производящих на продажу тестовое оборудование для проведения испытаний на устойчивость к ПЭДВ в соответствии со стандартами, в мире очень немного. Крупные установки, предназначенные для симуляции ЭМИЗ, выпускаются компаниями Dayton T. Brown (США), AeroRad Technology Co., Ltd (Китай) и некоторыми другими. Небольшие испытательные установки, пригодные для лабораторных испытаний электронной аппаратуры типа МУРЗ на устойчивость к ЭМИЗ, выпускают-

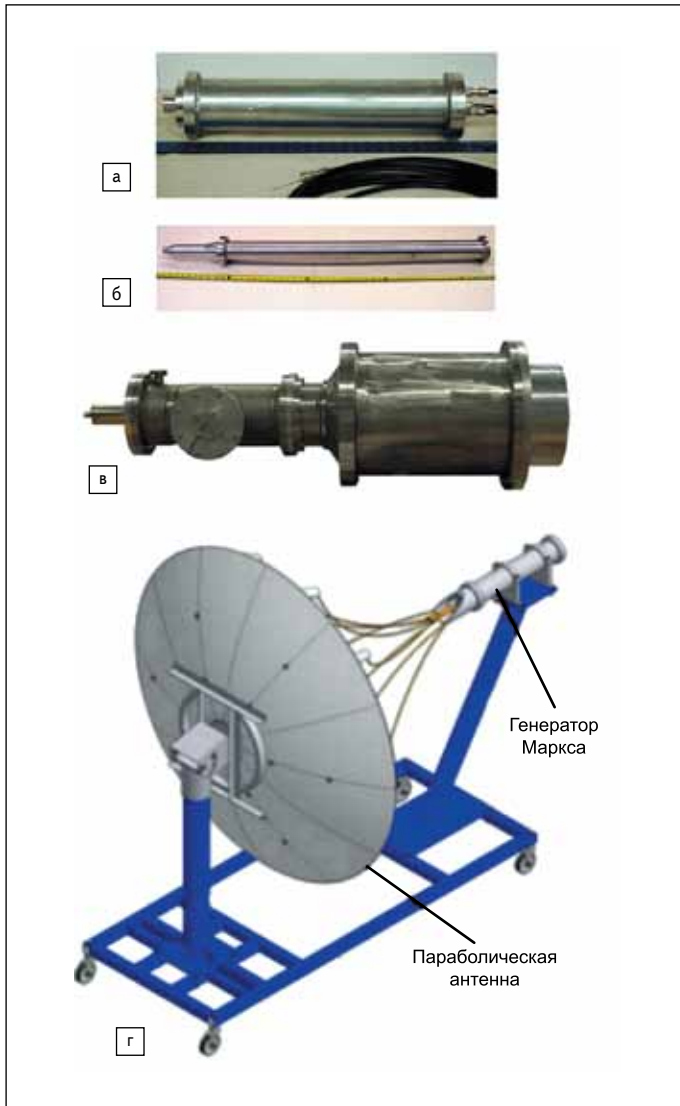
ся лишь двумя компаниями: швейцарской Montena Technology и американской Applied Physical Electronics (рис. 10).

Компания Montena Technology (США) выпускает множество видов испытательной аппаратуры, в том числе и достаточно крупных стендов (высота 1,8 м, полная длина 7 м), пригодных для испытаний целых шкафов с электронной аппаратурой, например шкафов релейной защиты на устойчивость к ЭМИ ЯВ (рис. 11).

Что касается испытательного оборудования для тестирования электронной аппаратуры на устойчивость к ПИЭВ, то в качестве такого оборудования могут быть использованы компактные генераторы Маркса различной мощности, снабженные направленной антенной, предлагаемые в широком ассортименте компаний Applied Physical Electronics (рис. 12).



Рис. 11. Испытательный стенд, производимый на продажу компанией Montena Technology для лабораторных испытаний (слева виден генератор импульсов, справа — антенная система)



**Рис. 12.** Компактные генераторы Маркса большой мощности:  
 а) MG10-1C-2700PFF (300 кВ, 1 ГВтр);  
 б) MG17-1C-500PF (510 кВ, 400 МВтр);  
 в) MG30-3C-100NF (600 кВ, 6 ГВтр);  
 г) источник РЧЭМИ на основе этих генераторов с направленной параболической антенной

Гораздо сложнее обстоит дело с испытательным оборудованием для тестирования на устойчивость электронной аппаратуры к КИВ (Electrical Fast Transient — EFT), рис. 7. Ранее генераторы EFT с требуемым уровнем выходного напряжения 8 кВ выпускались компаниями TESEQ, Kentech Instruments Ltd. и Thermo 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 нами анализ показал, что на сегодня 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, производимый шведской компанией Haefely EMC Technology (рис. 13).



**Рис. 13.** Генератор EFT типа PEFT 8010 с максимальной амплитудой импульсов 7,3 кВ, выпускаемый компанией Haefely EMC Technology (Швеция):  
 а) вид на переднюю панель; б) вид задней панели

## Выводы

Для испытаний МУРЗ на устойчивость к ПЭДВ необходимы три типа воздействий, проводимых в дополнение к полному комплексу испытаний на электромагнитную совместимость [19]:

- 1) импульсное электромагнитное излучение с длительностью фронта импульса 2 нс, шириной импульса 25 нс и с напряженностью поля 5–50 кВ/м;
- 2) импульсное электромагнитное излучение с длительностью фронта импульса 100 пс, шириной импульса 1 нс, частотой следования импульсов 1 МГц и напряженностью поля 10 кВ/м;
- 3) быстрый импульс 5/50 нс (EFT) с амплитудой импульса 8 кВ, подаваемый контактным способом на входы МУРЗ.

Компактная испытательная аппаратура с параметрами, достаточно близкими к требуемым, имеется на рынке в свободной продаже. Это делает вполне возможным и доступным организацию специализированной лаборатории по проверке устойчивости современных устройств релейной защиты и других видов так называемой критической электронной аппаратуры промышленного назначения на устойчивость к преднамеренным электромагнитным деструктивным воздействиям. Стоимость комплекта оборудования для такой лаборатории составляет около 500 тыс. долларов США.

## Литература

1. Barnes P. R., McConnell B. W., Van Dyke J. W. Electromagnetic Pulse Research on Electric Power Systems: Program Summary and Recommendations. — Oak Ridge National Laboratory, No. ORNL-6708, 1993.
2. Гуревич В. И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты. Проблемы и решения. М.: Инфра-Инженерия, 2014.
3. FM 3-38 Cyber Electromagnetic Activities — Headquarters Department of the Army Washington, DC, 12 February, 2014.
4. Platt R., Anderson B., Christofferson J., Enns J., Haworth M., Metz J., Pelletier P., Rupp R., Voss D. Low-frequency multigigawatt microwave pulses generated by a virtual cathode oscillator // Applied Physics Letters 27.03. 1989, Vol. 54 Issue 13.
5. Counter-Electronics High Power Microwave Advanced Missile Project (CHAMP) Joint Capability Technology Demonstration (JCTD). Solicitation Number: BAA-08-RD-04, 16 October 2008 (Restricted Data).
6. Методы обеспечения стойкости перспективных систем радиорелейной, тропосферной и спутниковой связи к воздействию мощных импульсных электромагнитных помех / Воскобович В. В. — 05.12.13 — Москва, 2002.
7. Разработка методов оценки стойкости телекоммуникационных систем к воздействию сверхширокополосных электромагнитных импульсов / Ведмидский А. А. — 05.12.13 — Москва, 2003.

8. Теоретические и экспериментальные методы оценки устойчивости терминалов к воздействию сверхширокополосных электромагнитных импульсов / Акбашев Б. Б. — 05.12.13 — Москва, 2005.
9. Методы и средства оценки воздействия электромагнитного импульса большой энергии на телекоммуникационные сети / Якушин С. П. — 05.12.13 — Москва, 2004.
10. Radasky W., Savage E. Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) and Its Impact on the U. S. Power Grid — Meta-R-323. Metatech report for Oak Ridge National Laboratory, 2010.
11. NATO AECTP-250 Leaflet 257 — High Power Microwave (HPM).
12. MIL-STD-461F Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, 2007.
13. Staines G. Compact Sources for Tactical RF Weapons Application. — DIEHL Munitionssysteme. Amerem-2002, Maastricht, Netherlands, 2002.
14. Barker R. and Shamiloglu E. High-Power Microwave Sources and Technologies. IEEE Press, New York, 2001.
15. Prather W., Baum C. et al. Ultra-wideband Source and Antenna Research. IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 28, Oct. 2000.
16. Многоволновые СВЧ-генераторы сверхбольшой мощности / Кошелев В. И. — 01.04.04 — Томск, 1990.
17. Мощные импульсные СВЧ-генераторы на основе лампы обратной волны в режиме сверхизлучения / Ельчанинов А. А. — 01.04.04 — Томск, 1990.
18. Генерация мощного СВЧ-излучения на основе сильноточных наносекундных электронных пучков / Коровин С. Д. — 01.04.04 — Томск, 1990.
19. Гуревич В. И. Проблемы стандартизации в области микропроцессорных устройств релейной защиты // Компоненты и технологии. 2012. № 1.