

Проблема устойчивости микропроцессорных систем релейной защиты и автоматики к преднамеренным деструктивным электромагнитным воздействиям. Часть 1

Владимир ГУРЕВИЧ,
к. т. н.

Того, кто не задумывается о далеких трудностях, ждут близкие неприятности.

Конфуций

Актуализация проблемы электромагнитной совместимости для современной электроэнергетики

Десятилетиями проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) были прерогативой специалистов в области электроники, радиотехники и связи. Неожиданно, в последние 10–15 лет, эта проблема стала весьма актуальной и в электроэнергетике. Конечно, довольно значительные электромагнитные поля на энергообъектах существовали всегда. Однако применявшиеся десятилетиями устройства автоматики, управления и релейной защиты электромеханического типа были мало подвержены такому влиянию, и никаких особых проблем с ЭМС не возникало. Последние два десятилетия характеризуются интенсивным переходом от электромеханических к микропроцессорным устройствам релейной защиты (МУРЗ) и автоматики в электроэнергетике. Причем переход этот осуществляется не только по мере строительства новых подстанций и электростанций, но и путем замены на суперсовременные старых электромеханических реле защиты (ЭМЗ) на древних энергообъектах, построенных еще в те времена, когда никто даже не предполагал использование на них микропроцессорной техники. МУРЗ оказались весьма чувствительными к электромагнитным помехам, поступающим «из воздуха», по цепям оперативного тока, напряжения и трансформаторов. Известны случаи ложного срабатывания микропроцессорных устройств на действующих объектах «Мосэнерго» — Очаковской и Зубовской подстанциях. Алгоритм работы защит на-

рушался из-за работающего поблизости экскаватора, электросварки, молнии и некоторых других помех. Липецкую подстанцию, приобретение МУРЗ для которой обошлось почти в полтора миллиона долларов, около полугода невозможно было ввести в строй из-за проблем с микропроцессорными устройствами. В итоге объект запускали, используя комплект традиционных защит [1]. Отмечались случаи ложного срабатывания МУРЗ даже от мобильного телефона [2]. На практике приходилось сталкиваться со случаями, когда, например, короткие замыкания по стороне 110 кВ вызывали ложное срабатывание защит по стороне 330 кВ, а помехи при коммутациях по одному классу напряжений проникали (через общие цепи оперативного тока) на входы аппаратуры РЗА, работающей по другому классу напряжения [3]. Неправильная работа релейной защиты по причине недостаточной ЭМС, по данным «Мосэнерго», составляет до 10% от всех случаев ложных срабатываний и касается, в основном, только реле на микроэлектронной и микропроцессорной элементной базе [4]. Наиболее наглядно это показывает опыт включения МП-защит фирмы Siemens на ТЭЦ-12 ОАО «Мосэнерго» по проекту, выполненному институтом «Атомэнергопроект». При проектировании никак не были учтены требования ЭМС. Вследствие помех только за период с августа по декабрь 1999 г. было зарегистрировано более 400 ложных информационных сигналов по дискретным и аналоговым входам МУРЗ [4]. При этом следует иметь в виду, что из-за концентрации большого количества функций в МУРЗ цена каждого его отказа раз в десять выше, чем убытки от сбоя

одного электромеханического реле. Столь высокий процент случаев неправильной работы по причине недостаточной ЭМС вызван тем, что чувствительность к электромагнитным помехам МУРЗ на несколько порядков выше, чем у традиционных электромеханических защит. Так, по данным [4], если для нарушения работы электромеханического реле требуется энергия 10^{-3} Дж, то для нарушения работы интегральных микросхем требуется всего 10^{-7} Дж. Разница составляет четыре порядка, или 10 000 раз.

Степень повреждения зависит как от устойчивости каждого из компонентов схемы, так и от энергии мощной помехи в целом, которая может быть поглощена схемой без появления дефекта или отказа. Например, для электромагнитного реле с катушкой на напряжение 230 В переменного тока коммутационная помеха от индуктивной нагрузки с амплитудой 500 В хотя и является более чем двукратным перенапряжением, но вряд ли приведет к отключению реле в силу стойкости электромеханики и вследствие малой длительности такой помехи (в течение микросекунд). Иначе обстоит дело с микросхемой, питающейся от источника 5 В постоянного тока. Импульсная помеха с амплитудой 500 В в 100 раз превышает напряжение питания этого электронного компонента и приводит к неизбежному отказу и последующему разрушению устройства. Стойкость микросхем к перенапряжениям на несколько порядков ниже, чем электромагнитных реле [5]. Многолетние наблюдения подтверждают, что число таких повреждений удваивается каждые три-четыре года [5]. Эта статистика хорошо согласовывается с так называемым законом Мура [6], еще в 1965 г. показавшим, что количество полупроводнико-

вых компонентов в микрочипах удваивается примерно каждые два года и такая тенденция сохраняется уже много лет. Если каких-то десять лет тому назад микросхемы так называемой транзисторно-транзисторной логики (TTL) содержали 10–20 элементов на квадратный миллиметр и имели типичное напряжение питания 5 В, то сегодня популярные микросхемы могут содержать почти сто транзисторов CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) на каждом квадратном миллиметре поверхности и имеют напряжение питания всего лишь 1,2 В. Новейшие технологии твердого тела, например SOS (Silicon-On-Sapphire), поднимают плотность элементов до 500 на одном квадратном миллиметре поверхности [7]. Очевидно, что для таких микросхем потребуется еще более низкое напряжение питания. При этом совершенно очевидно, что с повышением степени интеграции в микроэлектронике уменьшается устойчивость ее компонентов к высоковольтным импульсным перенапряжениям по причине уменьшения зазоров между электропроводящими элементами, утончения изоляционных слоев и снижения собственных рабочих напряжений полупроводниковых элементов.

Современные тенденции развития техники и постоянно растущая уязвимость национальных инфраструктур (энерго- и водоснабжение, системы связи и т. д.) к электромагнитным воздействиям уже давно привлекли внимание военных. В исследовательских центрах практически всех развитых стран мира ведутся интенсивные исследования и разработки в области создания специальных средств поражения электронной аппаратуры. В открытой печати опубликованы десятки материалов, в которых совершенно свободно обсуждаются методы повышения эффективности воздействия электромагнитных излучений на электронную аппаратуру с целью выведения ее из строя [8–12].

Особенно сильным и мощным поражающим эффектом обладает высотный ядерный взрыв. Такой взрыв, произведенный на высоте 200–300 км, не может повлиять на человека непосредственно и останется практически незаметным, но воздействие сопровождающего его электромагнитного импульса (вернее, целой серии импульсов, имеющих различные характеристики) на электронную и компьютерную аппаратуру целой страны окажется катастрофическим (таблица). Положение дел в электроэнергетике будет особо тяжелым вследствие огромной протяженности воздушных линий электропередачи, являющихся гигантскими антеннами, абсорбирующими энергию электромагнитного импульса с огромной территории и доставляющими ее прямо к аппарату электростанций и подстанций. Ввиду особой опасности такого взрыва для электроэнергетики Международной электротехнической комиссией (МЭК) разработана серия специальных стандартов, посвященных описанию методов

испытаний линий электропередачи и другого энергетического оборудования на устойчивость к высотному ядерному взрыву [13–31].

Появившаяся в последние годы новая концепция под названием «Интеллектуальная сеть» (Smart Grid) в случае ее широкого внедрения в практику будет означать, как показано в [32], конец национальной электроэнергетики даже при единичном высотном ядерном взрыве, что делает его весьма заманчивым и привлекательным для противоположной стороны.

Классификация и особенности преднамеренных деструктивных электромагнитных воздействий

В англоязычной технической литературе преднамеренные деструктивные электромагнитные воздействия (ПДЭВ) называются High Power Electromagnetic Threats (НРЕМ) и подразделяются на два вида: ВЭМИ — высотный электромагнитный импульс (High-Altitude Electromagnetic Pulse, НЕМР) и ПЭМ — преднамеренные электромагнитные помехи (Intentional Electromagnetic Interference, ИЭМИ).

ВЭМИ — очень мощный электромагнитный импульс, являющийся следствием высотного ядерного взрыва. О мощном электромагнитном импульсе как об одном из поражающих факторов, возникающих при таком взрыве, было известно уже давно. То, что ядерный взрыв будет обязательно сопровождаться электромагнитным излучением, следовало из теоретических исследований воздействия рентгеновского излучения, выполненных американским физиком-теоретиком Артуром Комптоном еще 1922 г. (в 1927 году за это открытие он был удостоен Нобелевской премии). В то далекое время на этот эффект не обратили особого внимания и вспомнили о нем с началом испытательных ядерных взрывов. В [33] об этом рассказывается так: «В конце июня 1946 г. в районе атолла Бикини (Маршалловы острова) под кодовым названием «Операция Кроссруд» были проведены ядерные взрывы, в ходе которых исследовалось поражающее действие атомного оружия. Было обнаружено новое физическое явление — образование мощного импульса электромагнитного излучения (ЭМИ), которое сразу же вызвало большой интерес. Особенно значительным оказался ЭМИ при высоких взрывах. Летом 1958 г. были произведены ядерные взрывы на больших высотах. Первую серию под кодовым названием «Хардтэк» провели над Тихим океаном вблизи острова Джонстон. В ходе испытаний были взорваны два заряда мегатонного класса: «Тэк» (на высоте 77 км) и «Ориндж» (на высоте 43 км). В 1962 г. на высоте 450 км был произведен взрыв боеголовки мощностью 1,4 Мт (операция носила название «Старфиш»). Советский Союз также в течение 1961–1962 гг. провел серию испытаний, в ходе которых исследовалось

воздействие высотных взрывов (180–300 км) на функционирование аппаратуры систем ПРО. При проведении этих испытаний были зафиксированы мощные электромагнитные импульсы, которые обладали большим поражающим действием на электронную аппаратуру, линии связи и электроснабжения, радио- и радиолокационные станции на больших расстояниях».

Зависимость зоны эффективного поражения электронной аппаратуры от высоты подрыва заряда мощностью 10 Мт приведены в таблице.

Таблица. Зависимость зоны эффективного поражения электронной аппаратуры от высоты подрыва заряда мощностью 10 Мт

| Высота взрыва, км | Примерный диаметр зоны поражения, км |
|-------------------|--------------------------------------|
| 40 | 1,424 |
| 50 | 1,592 |
| 100 | 2,242 |
| 200 | 3,152 |
| 300 | 3,836 |
| 400 | 4,402 |

В соответствии с классификацией Международной электротехнической комиссии (МЭК) выделяют три компонента ВЭМИ: E1, E2 и E3.

Компонент E1

E1 — самый «быстрый» и самый «короткий» компонент ВЭМИ, обусловленный мощным потоком комптоновских электронов высокой энергии (являющихся продуктом взаимодействия γ -квантов мгновенного излучения ядерного взрыва, движущихся в магнитном поле Земли с околосветовой скоростью с атомами газов воздуха). Это взаимодействие 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 спадает вдвое в течение 200 нс. По определению МЭК, полная продолжительность импульса E1 может составлять около одной микросекунды (1000 нс). Компонент E1 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. Именно E1 вызывает большинство повреждений электронного оборудования, связанных с воздействием перенапряжений и электрическим пробоем $p-n$ -переходов полупроводниковых элементов и изоляции. Обычные разрядники, эффективные для защиты от атмосферных перенапряжений, не всегда успевают сработать и защитить оборудование от воздействия этого импульса, а рассеиваемая ими мощность далеко не всегда достаточна для поглощения энергии E1, в результате чего обычные разрядники могут просто разрушиться.

Компонент E2

E2 — это «промежуточный» по скорости нарастания и длительности компонент ВЭМИ, который, по определению МЭК, длится примерно 0,1–1 мс. Компонент E2 имеет много общего с электромагнитными импульсами атмосферного происхождения (близкой молнией). Напряженность поля может достигать 100 кВ/м. Из-за сходства параметров E2 с молнией и хорошо отработанных технологий защиты от нее считается, что защита от этого компонента не представляет проблемы. Однако при совместном воздействии компонентов E1 и E2 появляется проблема другого рода, когда под действием первого разрушаются защитные элементы, после чего второй беспрепятственно проникает в аппаратуру.

Компонент E3

Компонент E3 весьма отличается от предыдущих. Это очень «медленный» импульс, длящийся от десятков до сотен секунд, что обусловлено смещением и последующим восстановлением магнитного поля Земли. Он имеет сходство с геомагнитной бурей, вызванной очень интенсивной солнечной вспышкой. Напряженность индуцированного поля может доходить до 1 В/км. Как и геомагнитная буря, E3 приводит к возникновению в длинных электрических проводниках (включая протяженные ЛЭП) значительных геомагнитных индуцированных токов, которые, проникая в силовые трансформаторы, могут вызвать их насыщение, сопровождающееся резким снижением импеданса и ростом токов, вплоть до перегорания обмоток.

С 80-х годов прошлого столетия в ряде стран мира усиленно работают над созданием так называемого «Супер-ЭМИ» — ядерного заряда с усиленным выходом электромагнитного излучения. Работы ведутся в основном в двух направлениях: за счет создания вокруг заряда оболочки из вещества, испускающего γ -излучение высокой энергии при облучении его нейтронами ядерного взрыва, а также за счет фокусировки γ -излучения. По расчетам специалистов, с помощью «Супер-ЭМИ» можно будет создать напряженность поля у поверхности Земли порядка сотен и даже тысяч киловольт на метр. Причем военные и не скрывают, что главными целями такого ЭМИ-оружия в будущих конфликтах будут системы государственного и военного управления, национальная инфраструктура, включающая системы электро- и водоснабжения, связи.

Мощный ЭМИ можно создать не только в результате ядерного взрыва. Современные достижения в области неядерных генераторов ЭМИ позволяют сделать их достаточно компактными для использования с обычными и высокоточными средствами доставки. Поэтому вопросы защищенности от воздействия ЭМИ будут оставаться в центре внимания специалистов при любом исходе переговоров о ядерном разоружении.

Преднамеренные электромагнитные помехи

ПЭМ — второй тип преднамеренных деструктивных электромагнитных воздействий, не связанный с ядерным взрывом. Первые теоретические идеи о возможности создания неядерных ударно-волновых излучателей сверхмощных электромагнитных импульсов (УВИ) были высказаны в начале 50-х годов прошлого столетия академиком Андреем Сахаровым при работе над ядерным боезарядом.

Для получения первичных нейтронов, «запускающих» процесс деления в ядерном боезаряде, потребовался сверхмощный источник импульса тока. Генератор Сахарова представлял собой кольцо из взрывчатого вещества, окружающего медную катушку. Набор подрываемых синхронно детонаторов инициирует детонацию, направленную к оси. В момент разряд мощного конденсатора, ток которого формирует магнитное поле внутри катушки. Ударная волна огромным давлением (около миллиона атмосфер) сминает и «закорачивает» витки катушки, превращая ее в трубку и замыкая это поле внутри нее. Контур с током сжимается со скоростью несколько километров в секунду, в зависимости от типа взрывчатки. Как известно из физики, интенсивность магнитного потока, создаваемого

контуром в этом случае, пропорциональна скорости изменения индуктивности по времени. Поскольку размер катушки меняется с огромной скоростью при схлопывании контура, то, соответственно, и амплитуда магнитного потока получается также огромной (десятки миллионов ампер). В этот момент с помощью пиропатрона разрушают один из торцов резонатора (рис. 1), а ударная волна, сойдясь в точку и отразившись, устремляется обратно, скачком изменяя поле. При этом стоячая волна превращается в бегущую, развивая при этом огромную импульсную мощность, что и приводит к генерации импульсного потока радиочастотного электромагнитного излучения. За доли наносекунды поле меняется, но не по закону синуса с периодом, равным времени сжатия-разрежения, а более резко, и это значит, что в функции, описывающей его изменение, присутствуют многие частоты. Поэтому ударно-волновой источник является сверхширокополосным и излучает в диапазоне от сотен мегагерц до сотен гигагерц при продолжительности этого импульса десятки-сотни микросекунд.

По американским данным, ударно-волновые излучатели были впервые продемонстрированы Кларенсом Фуллером в Лос-Аламосской национальной лаборатории США в конце 50-х годов [34]. Уже в 60-е годы не только ученым в США и СССР, но и политикам

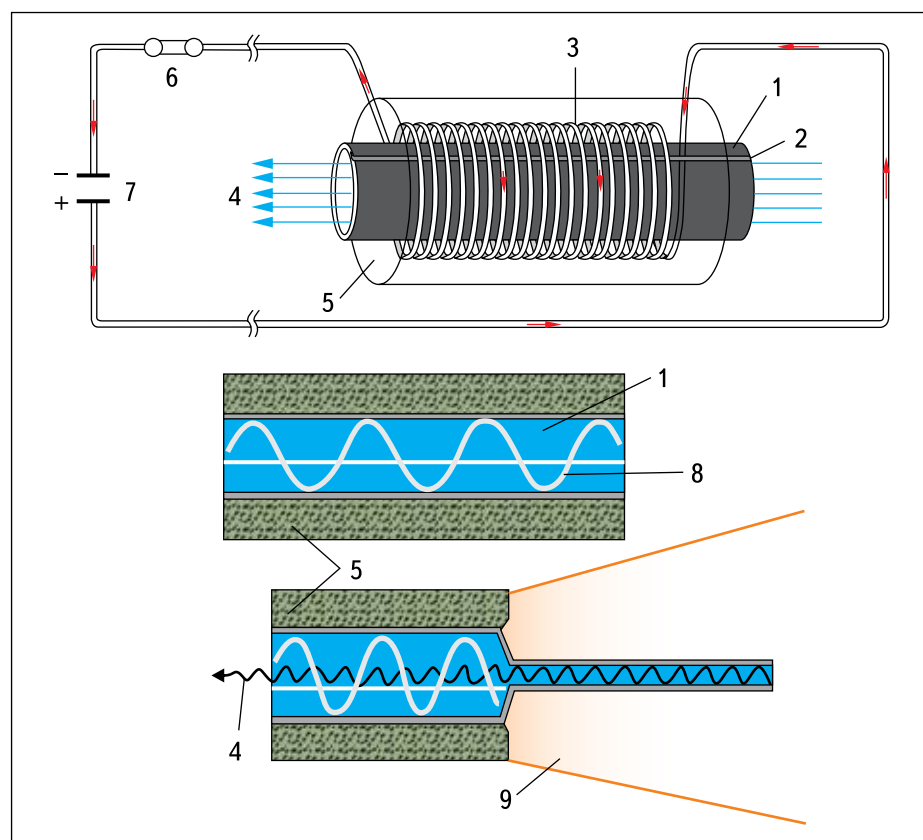


Рис. 1. Неядерный ударно-волновой излучатель сверхмощных электромагнитных импульсов: 1 — электромагнитный резонатор; 2 — разрез; 3 — катушка, обтекаемая током; 4 — направленное электромагнитное излучение; 5 — взрывчатое вещество; 6 — коммутатор; 7 — накопитель энергии (конденсатор); 8 — стоячая волна; 9 — разлетающиеся продукты взрыва

стало понятно, что такого рода источники сверхмощных электромагнитных импульсов могут стать основой для создания нового вида вооружения. Свидетельством этому стали выступления Н. С. Хрущева в 60-х годах с его упоминаниями некоего «фантастического оружия». Конечно, для его создания на основе чисто теоретических разработок потребовалось время. Об УВИ как о самостоятельном устройстве для преднамеренного создания сверхмощных электромагнитных импульсов впервые было официально заявлено докт. техн. наук А. Б. Прищепенко, в то время занимавшим должность начальника лаборатории боеприпасов специального назначения ЦНИИ химии и механики, после успешных испытаний 2 марта 1984 г. на Софринском полигоне Красноармейского научно-исследовательского института «Геодезия» (ныне ФКП НИИ «Геодезия»). Позднее, будучи чл.-корр. Академии военных наук, Прищепенко сформулировал общие принципы боевого применения электромагнитных боеприпасов.

Сегодня интенсивные исследования в области ПЭМ ведутся в нескольких направлениях, и УВИ уже не являются единственным видом неядерного электромагнитного оружия.

Существует широкий набор микроволновых устройств высокой мощности. Это релятивистские клистроны и магнетроны, рефлекс-триоды, лампы обратной волны (ЛОВ), гиротроны, осцилляторы с виртуальным катодом (т. н. «виркаторы», Virtual Cathode Oscillator) и др. Виркаторы способны произвести очень мощные одиночные импульсы энергии, они конструктивно просты, небольшие по размерам, прочные и способны работать в относительно широкой полосе частот микроволнового диапазона. Фундаментальная идея, лежащая в их основе, заключается в ускорении мощного потока электронов сетчатым анодом. Этот мощный поток электронов изначально вырывается из катода (металлического цилиндрического стержня диаметром в несколько сантиметров, рис. 2) под действием импульса высокого напряжения (сотни киловольт), придающего эмиссии электронов взрывной характер. Значительное число электронов проходит через сетчатый анод, формируя облако пространственного заряда за анодом. При определенных условиях эта область пространственного заряда будет осциллировать в области анода. Образованное на частоте колебаний электронного облака СВЧ-поле излучается в пространство через диэлектрическое окно. Стартовые токи в виркаторах, при которых возникает генерация, составляют 1–10 кА. Виркаторы наиболее приемлемы для генерации импульсов наносекундной длительности в длинноволновой части сантиметрового диапазона. Экспериментально на них получены мощности от 170 кВт до 40 ГВт в сантиметровом и дециметровом диапазонах.

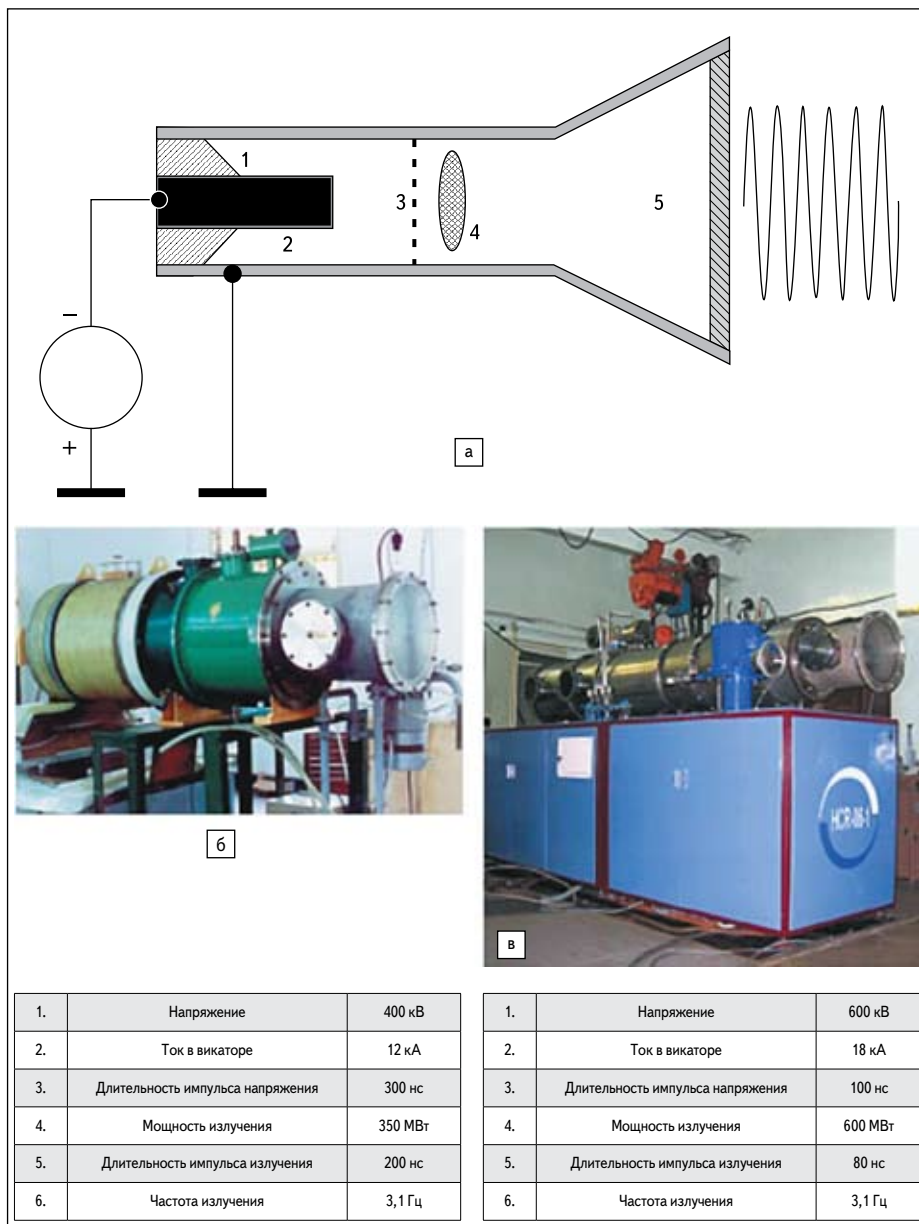


Рис. 2. а) Мощные виркаторы, разработанные в Томском политехническом институте: 1 — изолятор; 2 — металлический катод; 3 — сетчатый анод; 4 — виртуальный катод; 5 — диэлектрическое окно; б) виркаторы с индуктивными накопителями энергии; в) виркаторы с емкостными накопителями энергии

По опубликованным данным, экспериментальная установка, развивающая импульсную мощность около 1 ГВт (265 кВ, 3,5 кА), способна поражать электронную аппаратуру на расстоянии 800–1000 м (рис. 3).

Даже такие хорошо известные устройства, как высоковольтные импульсные генераторы Маркса (рис. 4), содержащие набор высоковольтных конденсаторов и разрядников (80 одинаковых блоков), могут использоваться как мощные источники микроволнового излучения. В этом устройстве все конденсаторы сначала заряжаются параллельно от высоковольтного источника, а в момент синхронного пробоя управляемых разрядников оказываются соединенными последовательно. В передвижном генераторе FEBETRON-2020 (рис. 4) генерируются им-

пульсы тока в 6 кА при напряжении 2,3 МВ, в результате чего излучаются мощные электромагнитные импульсы.

Еще одним направлением развития ПЭМ является так называемое «пучковое оружие» (beam weapon). Оно основано на использовании узконаправленных пучков заряженных или нейтральных частиц, генерируемых с помощью различных типов ускорителей как наземного, так и космического базирования. Работы по созданию пучкового оружия получили наибольший размах вскоре после провозглашения в 1983 г. президентом США Р. Рейганом программы стратегической оборонной инициативы (СОИ). Центром научных исследований в этой области стали Лос-Аламосская и Ливерморская национальные лаборатории. По заявлению некоторых уче-

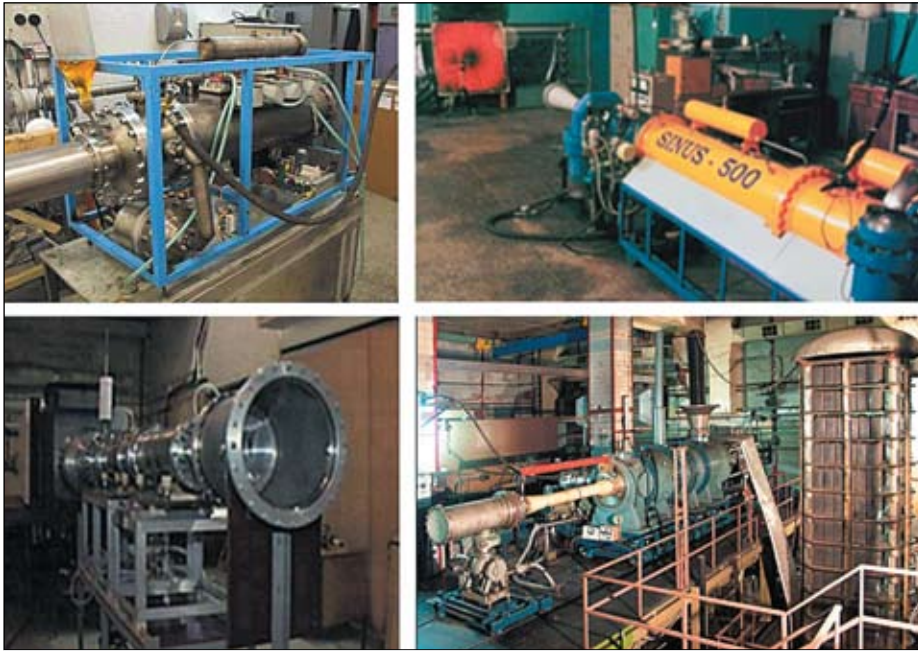


Рис. 3. Релятивистские микроволновые генераторы большой мощности на базе гиротронов, вилокаторов и ламп обратной волны, разработанные в различных российских НИИ

ных, предпринимавшиеся в них попытки получить поток высокоэнергетических электронов, по мощности превосходящий в сотни раз получаемый в исследовательских ускорителях, были успешными. Там же в рамках программы «Антигона» было экспериментально установлено, что электронный пучок почти идеально, без рассеяния, распространяется по ионизированному каналу, предварительно созданному лучом лазера в атмосфере.

Особую опасность представляют собой мощные компактные источники излучения, которые могут быть смонтированы в закрытом фургоне грузовика и даже в микроавтобусе. Так, в возглавляемом академиком Г.А. Месяцем Томском институте сильноточной электроники (ИСЭ) СО АН СССР, созданном в 1977 г. специально для исследований методов генерации сверхмощных (гига- и тераваттных) электрических импульсов, были разработаны достаточно компактные генераторы мощных (100–1000 МВт) линейно поляризованных однонаправленных волновых пучков сверхширокополосного электромагнитного излучения с наносекундной и субнаносекундной длительностью импульса для целенаправленного воздействия на электронную аппаратуру (рис. 5).

Причем такие источники можно сегодня совершенно свободно приобрести непосредственно в ИСЭ за совсем не «космическую» цену (\$40–60 тыс.) и установить в микроавтобусе или небольшом фургоне. Все координаты для заказа этой аппаратуры приведены на официальном сайте института. Аналогичные переносные и передвижные источники разрабатываются и производятся в США (рис. 6). Еще более мощный комплекс планируется установить на борту самолета АС-130. В некоторых странах (США, Израиль и др.) ведутся разработки компактных электромагнитных ружей относительно небольшой мощности, способных, однако, поражать электронику на расстояниях до 100 м. Интерес к устройствам такого рода проявляют не только военные, но и полицейские. Современный автомобиль, напичканный электроникой, представляет собой такой же объект поражения, как и любая другая современная система. Американская компания Eureka Aerospace разработала и запустила

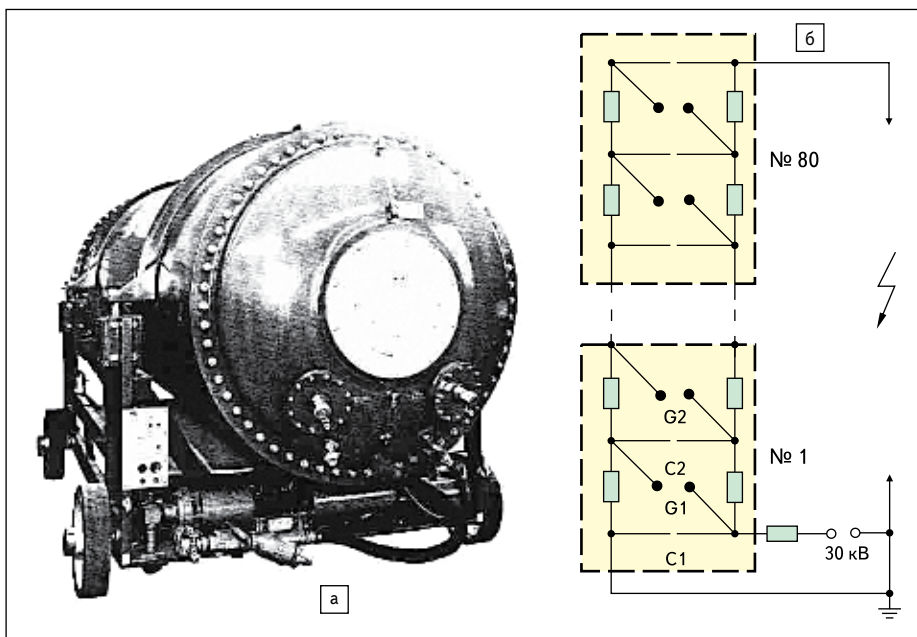


Рис. 4. а) Американский передвижной генератор FEVETRON-2020 на базе генератора Маркса; б) упрощенная схема



Рис. 5. Компактные мощные сверхширокополосные источники излучения мощностью до 1 ГВт, разработанные в Томском ИСЭ СО РАН



Рис. 6. а, б) Компактный источник мощного направленного ультракоротковолнового (95 ГГц) излучения, разработанный американской Sandia National Laboratories с использованием технологий компании Raytheon; в, г) мощные источники направленного излучения, смонтированные: в) на шасси джипа Hummer; г) на шасси БТР Stryker

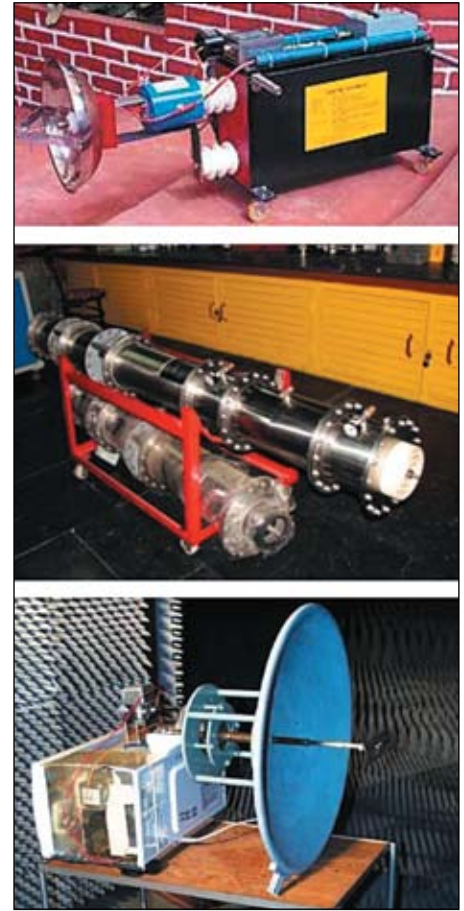


Рис. 7. Примеры направленных микроволновых генераторов самодельного изготовления

в производство электромагнитное устройство, способное остановить движущийся автомобиль (EMP car-stopper). Действие такого «оружия» основано на повреждении микропроцессора, системы зажигания, впрыска топлива и других электронных систем современного автомобиля. Что будет, когда такой инструмент попадет в руки террористов (рано или поздно, но это обязательно произойдет)? Впрочем, им даже не нужно особенно его искать. Описаниями самодельных систем подобного рода пестрят страницы многих популярных технических журналов (рис. 7).

Невольно вспоминается пророческое изречение Уинстона Черчилля, сделанное им много лет назад: «Каменный век может вернуться на сияющих крыльях науки».

Литература

1. Прохорова А. Интеллект — наше главное конкурентное преимущество (интервью с генеральным директором ОАО ЧЭАЗ М. А. Шурдовым) // Оборудование, рынок, предложения, цены. 2003. № 4.
2. Шалин А. И. Об эффективности новых устройств РЗА // Энергетика и промышленность России. 2006. № 1 (65).
3. Кузнецов М., Кунгуров Д., Матвеев М., Тарасов В. Входные цепи устройств РЗА. Проблемы защиты от мощных импульсных перенапряжений // Новости электротехники. 2006. № 6 (42).

4. Борисов Р. Невнимание к проблеме ЭМС может обернуться катастрофой // Новости электротехники. 2001. № 6 (12).
5. Правосудов П. Trabtech — технология для защиты электрооборудования от импульсных перенапряжений // Компоненты и технологии. 2003. № 6.
6. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits // Electronics. 1965. Vol. 38, No. 8.
7. Nailen R. L. How to Combat Power Line Pollution // Electrical Apparatus. Dec. 1984.
8. Панов В. В. и др. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. №№ 10–12.
9. Блудов С. Б. и др. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники // Физика плазмы. 1994. Т. 20. №№ 7–8.
10. Панов В. В., Саркисян А. П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. №№ 10–12.
11. Антипин В. В., Годовицын В. А., Громов Д. В., Кожевников А. С., Раваев А. А. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 1.
12. Пат. № 2154839 (РФ). Класс G01S13/00. Способ функционального поражения радиоэлектронных средств / А. Н. Диденко, А. С. Сулакшин, В. Е. Фортвов, Ю. Г. Юшков. 2000.

13. IEC/TR 61000-1-3 (2002-06) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 1–3: General — The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
14. IEC/TR 61000-1-5 Ed. 1.0 (2004-11) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 1–5: General — High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems.
15. IEC 61000-2-9 (1996-02) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2: Environment — Section 9: Description of HEMP environment — Radiated disturbance.
16. IEC 61000-2-10 (1998-11) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2–10: Environment — Description of HEMP environment — Conducted disturbance
17. IEC 61000-2-11 (1999-10) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2–11: Environment — Classification of HEMP environments
18. IEC 61000-4-23 (2000-10) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4–23: Testing and measurement techniques — Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.
19. IEC 61000-4-24 (1997-02) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4: Testing and measurement techniques — Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance.
20. IEC 61000-4-25 (2001-11) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4–25: Testing and

- measurement techniques — HEMP immunity test methods for equipment and systems.
21. IEC/TR 61000-4-32 (2002-10) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-32: Testing and measurement techniques — High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium.
 22. IEC 61000-4-33 Ed. 1.0 (2005-09) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-33: Testing and measurement techniques — Measurement methods for high power-transient parameters.
 23. IEC/TR 61000-5-3 (1999-07) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-3: Installation and mitigation guidelines — HEMP protection concepts.
 24. IEC/TS 61000-5-4 (1996-08) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5: Installation and mitigation guidelines — Section 4: Immunity to HEMP — Specification for protective devices against HEMP radiated disturbance.
 25. IEC 61000-5-5 (1996-02) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5: Installation and mitigation guidelines — Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance.
 26. IEC/TR 61000-5-6 (2002-06) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-6: Installation and mitigation guidelines — Mitigation of external influences
 27. IEC 61000-5-7 (2001-01) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-7: Installation and mitigation guidelines — Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code).
 28. IEC 61000-6-6 (2003-04) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 6-6: Generic standards — HEMP immunity for indoor equipment.
 29. IEC/TR 61000-4-35 (CD produced 2007-06) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-35: Testing and measurement techniques — High power electromagnetic (HPEM) simulator compendium
 30. IEC/TS 61000-5-8 (CD expected 2008-02) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-8: Installation and mitigation guidelines — HEMP protection methods for distributed infrastructure.
 31. IEC/TS 61000-5-9 (CD produced 2007-06) Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-9: Installation and mitigation guidelines — System-level susceptibility assessments for HEMP and HPEM.
 32. Гуревич В. И. Интеллектуальные сети (Smart Grid): новые перспективы или новые проблемы? // *Электротехнический рынок*. 2010–2011. №№ 6–1.
 33. Белоус В. Угроза использования ЭМИ-оружия в военных и террористических целях // *Ядерный контроль*. 2005. № 1 (75), том 11.
 34. Копп С. The E-bomb — a Weapon of Electronical Mass Destruction // *Information Warfare: Thunder's Month Press*. New York. 1996.