

**Использование полигонной установки Испытательного Центра  
РФЯЦ ВНИИТФ ВНИЦ (г.Истра) для испытаний электротехнического  
оборудования на стойкость к электромагнитному импульсу высотного  
ядерного взрыва**

Н.Н.Швец, Ю.А.Кузнецов, В.С.Сысоев, Н.М.Лепехин

Российский Федеральный Ядерный Центр-ВНИИ Технической Физики имени  
академ. Забабахина - отделение ВНИЦ (г.Истра)

Nikolay.Shvets@vniitf.ru

Эскалация международной напряженности, связанная с обострением конкуренции в мировой экономике, локальными военными конфликтами, террористической угрозой приводит к обострению существующих и появлению новых угроз для работоспособности и жизнедеятельности объектов инфраструктуры как военного, так и гражданского назначения. При этом возросла вероятность применения ядерного оружия в виде высотного ядерного взрыва (ВЯВ), основным поражающим фактором которого является электромагнитный импульс (ЭМИ), далее ЭМИ ВЯВ, способный выводить из строя современное электротехническое оборудование.

В этой связи с особой актуальностью встает вопрос о зависимости отечественной энергетики и инфраструктурных отраслей экономики от внешнеполитической и внешнеэкономической конъюнктуры, их устойчивости к неблагоприятным внешним условиям и необходимостью повышения надёжности, независимости и самодостаточности функционирования их технических систем. Экономика страны и ее промышленность должны быть готовы к нейтрализации и ликвидации возможных угроз инфраструктурным отраслям, и в первую очередь единой энергетической системе. Это делает необходимым освоение выпуска всех видов оборудования, обеспечивающих бесперебойное функционирование электроэнергетики и других инфраструктурных систем, развитие компетенций отечественных предприятий и обеспечение их устойчивой работы в мирное, военное и послевоенное время.

В связи с все более широким применением микропроцессорной техники в объектах электроэнергетики (устройствах релейной защиты, автоматики, телемеханики) возросла их уязвимость при воздействии электромагнитного импульса наносекундного диапазона техногенного характера [1÷3,11,12]. Такие импульсы способны вывести микропроцессорную технику из строя, что приведет к тяжелым последствиям вследствие нарушения снабжения электроэнергией важных промышленных и военных объектов.

Проблемы, связанные с воздействием ЭМИ ВЯВ на электронное и электротехническое оборудование, обсуждаются в специальной технической литературе [3,4,17]. Однако, до сих пор в гражданской электроэнергетике этой проблеме и нахождению средств защиты от ЭМИ ВЯВ уделяется недостаточное внимание.

Опасность ЭМИ ВЯВ была показана в результатах ядерных испытаний и исследований, проведенных более 50 лет назад. В нашей стране и за рубежом известны примеры повреждения оборудования инфраструктурных и электроэнергетических систем при проведении высотных ядерных взрывов. Для примера, в результате ВЯВ мощностью 300 килотонн проведенного над

Казахстаном в исследовательских целях в 1962г. в обеспечивающих системах наблюдались следующие явления [16]:

- из-за возникновения импульсных токов длительностью до 15 мкс и амплитудой от 1,5 кА до 3,4 кА и импульсных напряжений до 28 кВ в проводах воздушных телефонных линий, вышла из строя 570-километровая телефонная линия;

- на расстоянии до 600 км от эпицентра ВЯВ произошло срабатывание разрядников и перегорание предохранителей, что привело к повреждению систем радиосвязи и потери связи со множеством объектов;

- короткие замыкания и отключение линий электропередачи напряжением 35 кВ из-за пробоев керамических изоляторов, на некоторых участках изоляторы были полностью разрушены, провода упали на землю;

- выход из строя подземного кабеля протяженностью 1000 км, проходившего на глубине около 1 м;

- повреждение трансформаторов, генераторов и отключение автономных электростанций;

- выход из строя радиолокатора, расположенного на расстоянии 1000 км от эпицентра взрыва;

- повреждения аппаратуры различных технических систем на космодроме Байконур.

Полученные данные экспериментально подтверждают наличие зоны с радиусом в несколько сотен километров, в которой наблюдалось разрушающее воздействие ЭМИ ВЯВ на технические объекты инфраструктурных систем. Возникающий при этом ЭМИ, достигающий поверхности земли, имеет три основные компоненты, которые различаются по своим частотным характеристикам.

Как отмечается в книге [12, стр. 260] «Особенностью ЭМИ высотного ядерного взрыва является генерирование импульсного электромагнитного поля в результате нескольких механизмов: комптоновского, барометрического, магнитотормозного и магнитогидродинамического. В соответствии с этим генерируются три ЭМИ: первый, второй и третий. Первый обязан своим происхождением комптоновскому и барометрическому механизмам, второй – магнитотормозному, третий – магнитогидродинамическому». По описанию явления ВЯВ, приведенного в [17, стр. 89] следует, что мгновенное освобождение ядерной энергии сопровождается интенсивным импульсом излучения гамма-квантов (высокоэнергетическое рентгеновское излучение с энергией порядка МэВ, которое распространяется по всем направлениям со скоростью света). При взрыве на большой высоте над поверхностью Земли (например, 400 км) эти кванты в слоях атмосферы вследствие эффекта Комптона освобождают электроны, большая часть которых сохраняет первоначальное направление движения гамма-кванта и на своем дальнейшем пути к Земле за счет ударной ионизации образуют многочисленные вторичные электроны. Летящие к Земле электроны создают вместе с малоподвижными положительными ионами воздуха электрический диполь. За счет отклонения электронов в магнитном поле Земли (сила Лоренца) создается магнитный диполь. Изменяющееся во времени и в пространстве распределение заряда и

тока обуславливает изменяющееся электромагнитное поле, называемое электромагнитным импульсом ядерного взрыва. Этот импульс имеет вид, близкий к двойной экспоненте (качественно аналогичный нормированному грозовому импульсу) с длительностью фронта примерно 5 нс и временем спада примерно 200 нс.

Таким образом, явление ЭМИ ЯВ включает различные категории электромагнитных импульсов, возникающих в зоне источника (ЯВ) или в пространственных системах, на которые оказывается воздействие [13,14,17]. Высотные (выше 30 км) ЯВ генерируют, в соответствии с классификацией Международной электротехнической комиссии [6] три компонента электрического поля, наблюдаемых на поверхности земли: E1, E2, E3.

Наибольшую опасность на поверхности земли представляют ЭМИ, образующиеся при высотном ЯВ, генерирующие быстрый импульс E1 на раннем этапе. Напряженность электрического поля на уровне поверхности земли достигает значений до 100 кВ/м и представляет наибольшую опасность для технических объектов вследствие большой амплитуды и своего высокочастотного спектра [7,11,12,17]. На рисунке 1 приведены структура и временные параметры электрического поля, возникающего при высотном ЯВ на поверхности земли [18]. Импульс имеет фронт в несколько нс и длительность около 30 нс [11÷13]. Плотность мощности ЭМИ при этом достигает значений 6 МВт /кв. м. В результате компонента E1 вызывает большие перенапряжения в электрических цепях объекта и обуславливает повреждения имеющегося в нем электронного оборудования. Обычные защитные разрядники, эффективные для защиты от атмосферных грозовых перенапряжений (характерные времена срабатывания 1÷100мкс) не успевают среагировать и осуществить необходимую защиту оборудования.

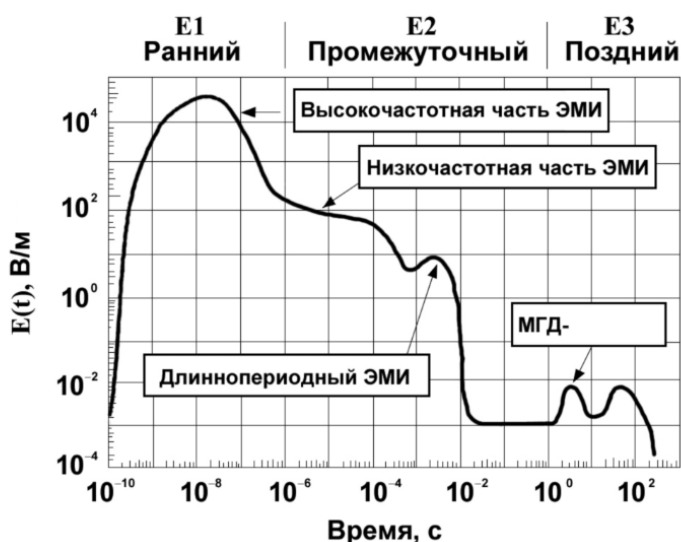


Рис.1. Электрическое поле при высотном ЯВ: компоненты E1, E2, E3 [18, с.381, рис.5.4].

Составляющая E2 по скорости нарастания и длительности компонент ЭМИ ВЯВ находится во временном интервале от 100 до 1000 мкс. Ее параметры схожи с импульсами, возникающими при близком от объекта

разряде молнии. Напряженность может достигать значительных величин. Из-за сходства параметров импульса E2 с молнией [17] считается, что защита от E2 достаточно хорошо отработана. Однако при совместном действии E1 и E2 появляются серьезные дополнительные проблемы (когда защитные устройства от E2 выводятся из строя импульсом E1).

Компонента E3 отличается от двух других компонент ЭМИ ВЯВ скоростью протекания процессов. Это очень медленная компонента, длящаяся десятки секунд, что обусловлено смещением и восстановлением магнитного поля Земли после взрыва. При этом имеется сходство с явлениями, происходящими при геомагнитных бурях. Компонента E3 может оказывать, в силу своей специфики, особенно сильное влияние на протяженные электротехнические объекты (линии электропередачи) [7,11,13,14].

Таким образом, имеющиеся данные экспериментально подтверждают большую зону разрушающего действия ЭМИ ВЯВ, достигающей несколько тысяч км [16]. Особо следует отметить, что при этих испытаниях происходил электрический пробой изоляторов линии электропередачи 35 кВ. Поскольку компонента E1 не может привести к перекрытию воздушной изоляции такой длины из-за своей малой длительности, можно предположить, что в данном случае к электрическому пробую привела компонента E2. Отсюда следует, что E2 может оказывать существенное воздействие на силовое электрическое оборудование высокого напряжения. Длительность импульса E2 (см. рис.2.а) может достигать больших значений (она превышает даже длительность импульсов при коммутационном напряжении). При этом известно [9,10], что при таких длинных импульсах воздействующего напряжения электрическая прочность длинных воздушных промежутков имеет аномально низкое значение. Из этого следует, что при высотном ЯВ деструктивное воздействие E2 (с точки зрения электрической прочности воздушной изоляции) оказывается существенно сильнее, чем при грозовых и коммутационных перенапряжениях. Следовательно, необходимо проведение испытаний изоляции оборудования при таких сверхдлинных (в несколько мс) импульсах напряжения и обеспечения специальных мер защиты от них.

Роль электроэнергетики и электроснабжения в обеспечении гражданской деятельности населения всё более увеличивается и, при воздействии ЭМИ ВЯВ, электроэнергетические системы могут оказаться неспособными сохранять работоспособность, что вызовет коллапс огромных регионов. Поэтому возникает острая необходимость в разработке основ защиты гражданской электроэнергетики.

Гражданские стандарты по обеспечению ЭМС при ЭМИ ВЯВ [4] были сформированы на основе полученных результатов исследования, но не являются достаточно проработанными. При этом серьезной проблемой является практическое отсутствие в стране необходимых испытательных установок, на которых можно было бы тестировать оборудование и объекты (особенно крупногабаритные) инфраструктурных систем гражданского назначения.

Отметим, что прежде всего испытания следует проводить на устойчивость к импульсу E1. При проведении таких испытаний

электроэнергетических объектов желательно, чтобы объекты были под нагрузкой (что в настоящее время не делается), это будет наиболее адекватно отражать реальные процессы. Это позволит наиболее точно учесть все важные факторы, влияющие на работоспособность объектов при воздействии на них ЭМИ ВЯВ.

Воздействие импульсов высотного ВЯВ аналогично воздействиям молниевых разрядов [1,12,17]. Аналогичны и методы расчета результатов воздействия, но эти методы являются достаточно сложными и требуют больших вычислительных ресурсов. При этом адекватность таких расчетов требует экспериментального подтверждения. Отсюда возрастает актуальность полигонных испытаний технических объектов на устойчивость к видам воздействующих импульсов на специальных установках. Создание испытательных установок, позволяющих проводить такие испытания, является достаточно сложной технической задачей и требует серьезных материальных и финансовых затрат. Поэтому использование уже имеющихся установок и накопленных экспериментальных и теоретических данных в этой области позволит существенно сократить затраты при решении данной проблемы.

С 2018 года начата реализации проекта «Модернизация испытательных центров ВНИЦ и ВЭИ РФЯЦ-ВНИИТФ» на базе оборудования Испытательных Центров ВЭИ и ВНИЦ (г. Истра) ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина». Создается Комплексный Испытательный Центр (КИЦ) для испытания электротехнического оборудования, производимого для МО РФ, российских АЭС, а также для создания сертификационного центра по испытанию электротехнического оборудования, производимого в РФ и применяемого на зарубежных АЭС дизайна ГК «Росатом».

В том числе в состав КИЦ входят две уникальные установки (рис.2,3), позволяющие проводить испытания на стойкость к ЭМИ ВЯВ. Эти установки ИЦ ВНИЦ, в добавлении к испытаниям на компоненту  $E_1$  (установка «Аллюр») позволяют также проводить полноценные испытания на стойкость к разрядам молнии (токи молнии и наведенные напряжения от близких ударов) и на компоненту  $E_2$  ЭМИ ВЯВ. Такое сочетание возможностей испытаний оборудования на ЭМС при воздействии ЭМИ при разряде молнии и ВЯВ (компоненты  $E_1$  и  $E_2$ ) на одном полигоне является уникальным и является большим конкурентным преимуществом модернизированного КИЦ.

Установка «Аллюр» состоит из импульсного источника высокого напряжения и полеобразующей системы в виде волновода конусной формы из металлических труб, предназначенной для размещения исследуемых и испытываемых объектов. Рабочий объем системы позволяет размещать испытываемые объекты с габаритами до 15x15x10 метров. Основные характеристики импульсов электромагнитного поля, создаваемого установкой:

- диапазон максимальных значений электрической составляющей напряженности электромагнитного поля  $20 \div 200$  кВ/м;
- диапазон максимальных значений магнитной составляющей напряженности электромагнитного поля  $52 \div 470$  А/м;
- диапазон длительностей импульса на уровне 0,5 от максимального значения  $2,5 \div 100$  наносекунд.

Установка прошла процедуры лицензирования и сертификации в соответствии с государственными и отраслевыми стандартами.

Вторая уникальная испытательная сверхвысоковольтная установка – генератор ГИН 6МВ (рис.3). Генератор способен формировать импульсы грозовых и коммутационных перенапряжений и может быть использован, как для серийных и тестовых испытаний электрической изоляции различных объектов, так и проведения широкомасштабных фундаментальных исследований газового разряда в длинных воздушных промежутках, физики молнии и молниезащиты.



Рис. 2. Комплексный испытательный центр РФЯЦ-ВНИИТФ (<http://vniitf.ru/article/vnits>)



Установка «Аллюр»



Генератор ГИН 6МВ

Рис. 3. Уникальные испытательные установки РФЯЦ-ВНИИТФ Отделение ВНИЦ г. Истра.

Генератор имеет следующие основные параметры:

- максимальное импульсное напряжение на выходе до 6 МВ,
- запасаемая энергия до 1.33 МДж;
- емкость в ударе 50 нФ;
- длительность фронта формируемых импульсов напряжения от 1.2 до 1200 мкс;
- длительность импульса от 50 до 10000 мкс;

Генератор ГИН 6МВ, ввиду своей большой запасаемой энергии, вполне позволяет проводить испытания на электрическую прочность изоляции объектов при воздействии компоненты  $E_2$  при ВЯВ.

При проведении испытаний крупногабаритных объектов большое значение имеет удобство их доставки на испытательный полигон и обеспечение необходимой электрической мощности при испытаниях под нагрузкой. Расположение (рис.4) недалеко от полигонов ИЦ ВНИЦ высоковольтной подстанции «Луч-220 кВ», входящей в состав ПАО «Федеральной сетевой компании РФ», и наличие автомобильных и железнодорожных подъездных путей упрощает как доставку на эти полигоны крупногабаритного электроэнергетического оборудования, так и проведение испытаний этого оборудования под нагрузкой.



Рис.4. Схема расположения испытательных установок РФЯЦ ВНИИТФ.

В настоящее время большая часть электротехнического оборудования, включая шкафы управления, релейной защиты, автоматики и т.д., отслужили свои сроки эксплуатации и морально устарели, резко ухудшилось состояние изоляции электрооборудования, силовых и контрольных кабелей, коммутационной техники, что обуславливает существенное снижение их надежности к воздействию разрядов молнии а также снижает их устойчивость и к электромагнитным воздействиям ЭМИ ВЯВ, обусловленных компонентой  $E_1$  и  $E_2$ . Значительная часть гражданских энергетических объектов управления и, прежде всего, их системы электроснабжения и связи, не защищены от электромагнитных воздействий ядерного взрыва с повышенным выходом электромагнитной энергии. Названные объекты и системы не обеспечены средствами защиты и не обеспечивают выполнение современных требований по электромагнитной совместимости. При этом некоторые меры могут существенно повысить степень защищенности. Например, наряду с процессом применения новых средств коммутации и использованием микропроцессорных устройств для управления, релейной защиты и автоматики, желательно сохранить и поддерживать в состоянии «горячего резерва» заменяемые устройства и системы учитывая, что электромагнитные реле имеют существенно более высокий порог защищенности от электромагнитных помех.

Устойчивость оборудования энергетического сектора к внешним и внутренним угрозам, в том числе экономическим, является одним из аспектов, формирующих состояние энергетической безопасности государства, которая определяется в Энергетической стратегии России как «состояние защищенности страны, регионов, граждан, экономики от угроз надежному энергообеспечению». Энергетическая безопасность является одной из ключевых гарантий суверенного развития страны, непосредственно влияющей на решение социально-экономических задач, конкурентоспособность России на глобальных рынках и рост её благосостояния. В связи с этим, проблеме обеспечения устойчивости работы электроэнергетических и других инфраструктурных систем в настоящее время следует уделять повышенное внимание.

Отметим следующие важные аспекты рассмотренной темы:

1. Актуальность разработки и внедрения мер по защите инфраструктурных систем от воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва.
2. Необходимость создания испытательных установок, позволяющих проводить полигонные испытания на стойкость электротехнического оборудования к ЭМИ ВЯВ. Учитывая, что это является очень дорогостоящим и длительным мероприятием, целесообразно восстанавливать и использовать имеющиеся установки.
3. Целесообразность создания универсального полигона, позволяющего проводить полигонные испытания на стойкость (как к ЭМИ ЯВ, так и при молниевом разряде), для проведения комплексных испытаний оборудования и аппаратных блоков электроэнергетических систем, в том числе и при работе их под нагрузкой. Такой полигон целесообразно реализовать на базе установок, имеющихся на стендах ВНИЦ ВНИИТФ (г.Истра).
4. Важность разработки предложений о внесении в проект «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» задачи обеспечения устойчивости объектов Единой энергетической системы России к воздействиям ЭМИ высотного ЯВ и направление их в Минэнерго РФ и другие организации.
5. Неотложность совершенствования государственных стандартов и нормативной правовой базы в интересах повышения надёжности функционирования инфраструктурных систем в условия применения вероятным противником ядерного оружия

Использованные источники:

1. В.И.Гуревич. Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него. М., 2019, 516с.



2. International Journal of Electrical and Electronics Research ISSN 2348-6988 (online) Vol. 6, Issue 2, pp: (76-89), Month: April - June 2018, Available at: [www.researchpublish.com](http://www.researchpublish.com)
3. K.V. Klein, P.R., Barnes, H.V. Zininger. Electromagnetic impulse and electrical power network. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-104. № 6, June 1985.
4. Электромагнитная совместимость в силовых установках и подстанциях. СИГРЕ. Рабочая группа С4.208, 2013.
5. В.Н.Бондалетов, В.Г.Филиппов, Ф.Э.Леменчук и др. Высоковольтный научно-исследовательский центр Всероссийского электротехнического института им. В.И.Ленина, г.Истра. История науки и техники, № 9, 2011, с.71-86.
6. ИЕС 61000-2-10(1998) Электромагнитная совместимость. Часть 2-10. Условия окружающей среды. Описание среды с электромагнитным высотным импульсом при высотных ядерных взрывах. Наведенные помехи. Дата введения в действие: 01.11.1998
7. В.И.Гуревич. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса. М., Инфа-Инженерия, 2016, 302с.
8. V.Gurevich. A Complementary View of NEMP for Electrical Engineers. International Journal of Electrical and Electronics Research, Vol. 6, Issue 2, pp: (76-89), Month: April - June 2018, [www.researchpublish.com](http://www.researchpublish.com).
9. Сысоев В.С., Макальский Л.М, Никитин О.А., Щербakov Ю.В. Экспериментальные исследования электрической прочности длинных и сверхдлинных воздушных промежутков. «Электро», №3, 2002, с.4-8.
10. Syssoev V.S. Definition of minimum sparkover voltages of long air gaps. 5th IEEE Power Tech Conference Bologna, Italy, 23-26 June, 2003, Paper # 332.
11. В.Ф.Федоров, Ю.Б.Котов, К.С.Мозгов, Т.А.Семенова. Микроволновое излучение ядерного взрыва. М., Книжный дом «Либроком», 2019,-304с.
12. А.А.Любомудров. Теоретические основы физических процессов ядерного взрыва. М., Физматлит., 2017.
13. Физика ядерного взрыва. Т.1. Развитие взрыва, М.:Физматлит, 2009, 832 с.
14. Физика ядерного взрыва.Т.2. Действие взрыва, М.:Физматлит, 2010, 620 с.
15. Физика ядерного взрыва. В 5 томах. Том 2. Действие взрыва Под редакцией Шиловбреева Б.А.,Изд.физматлит., 2010, 620с.
16. Loborev V. M. Up to date state of the NEMP problems and topical research directions / EUROEM Conf., Bordeaux, France, June 1994, pp. 15—21.
17. А. Шваб. Электромагнитная совместимость/ Под ред. Кужекина. М.: Энергоатомиздат, 1998. 480 с.

18. Л.Н.Кечиев, Н.В.Балюк. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС//Под редакцией Л.Н. Кечиева – М.: Грифон, 2014.-448 с.