

# **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 (ЯВ), основным поражающим фактором которого является электромагнитный импульс (ЭМИ), далее ЭМИ ЯВ, способный выводить из строя современное электротехническое оборудование.

В этой связи с особой актуальностью встал вопрос о зависимости отечественной энергетики и, шире – 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÷3,7,8]. 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 ЯВ на электронное и электротехническое оборудование, обсуждаются в специальной технической литературе [3,4]. Однако до сих пор в гражданской электроэнергетике этой проблеме и нахождению средств защиты от ЭМИ ЯВ уделяется недостаточное внимание.

Современный взгляд на проблему возникновения и опасности ЭМИ ЯВ основан на результатах ядерных испытаний и исследований, проведенных более 50 лет назад, и с тех пор существенно не изменился [2]. Гражданские стандарты по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) при ЭМИ ЯВ [4,6] были сформированы на основе этих результатов, но не являются достаточно проработанными. Серьезной проблемой является практическое отсутствие в России необходимых испытательных установок, на которых можно было бы тестировать объекты (особенно крупногабаритные) именно гражданского оборудования. В полной мере это относится и к объектам электроэнергетики.

Явление ЭМИ ЯВ включает различные категории электромагнитных импульсов, возникающих в зоне источника (ЯВ) или в пространственных системах, на которые оказывается воздействие [1,8]. Высотные (выше 30 км) ЯВ генерируют по классификации Международной электротехнической комиссии три компонента электрического поля, наблюдаемых на поверхности земли:

1. На раннем этапе (быстрый импульс) -  $E_1$ ;
2. На промежуточном этапе (средний импульс) -  $E_2$ ;
3. На позднем этапе (медленный импульс) -  $E_3$ .

Наибольшую опасность на поверхности земли представляют ЭМИ, образующиеся при высотном ЯВ, генерирующие быстрый импульс  $E_1$  на раннем этапе. Этот импульс ЭМИ формируется электронами Комптона, генерируемых при взаимодействии X-лучей, Гамма - лучей и нейтронов, возникающих при детонировании ядерного заряда на большой высоте, с молекулами воздуха. Электроны генерируют электрические токи и поперечные электрические поля, распространяющиеся до поверхности земли.

Физические процессы, приводящие к ЭМИ ЯВ, иллюстрируются рис.1.[1,8].

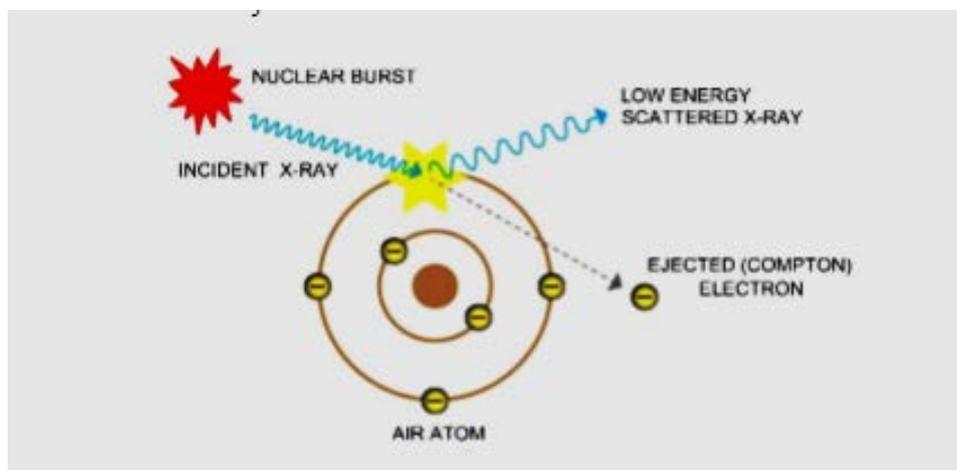
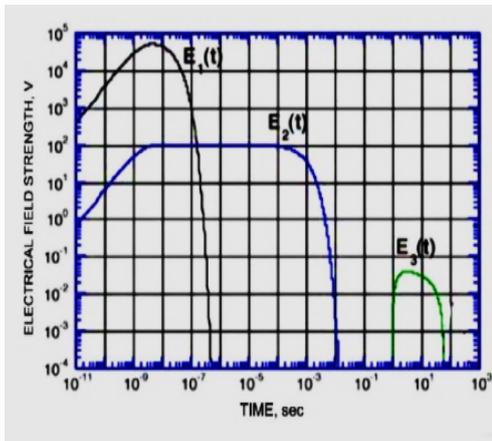


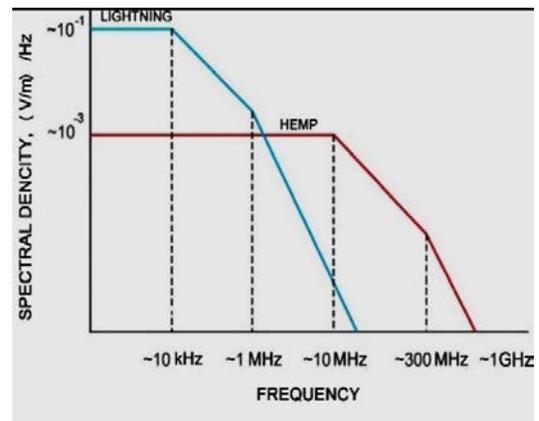
Рис. 1. Модель возникновения ЭМИ при эффекте Комптона.

При этом формируется мощный импульс электромагнитной энергии, направленный с высоты на Землю. Электрическое поле на уровне поверхности Земли достигает значений до 50 кВ/м и представляет серьезную опасность для технических объектов вследствие большой напряженности и своей высокой частоты.

На рис.2 даны временные параметры и спектр электрического поля, возникающего при высотном ЯВ на поверхности земли [1,7,8].



а)



б)

Рис.2. а) – электрическое поле б) – спектр поля при высотном ЯВ.

С точки зрения ЭМС наиболее опасным представляет собой импульс электрического поля  $E_1$  с фронтом в несколько нс и длительностью около 30 нс [1,7,8]. Плотность мощности ЭМИ при этом достигает значений 6 МВт/м<sup>2</sup>.

Типичные параметры компоненты  $E_1$  для разных зон воздействия на поверхности земли (А, В, С – различные зоны по удалению от центра взрыва, сплошная линия – усредненная кривая) представлены на рис. 3 [1, 8].

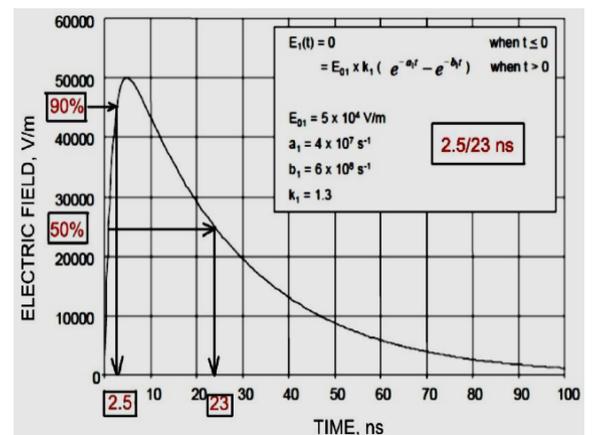
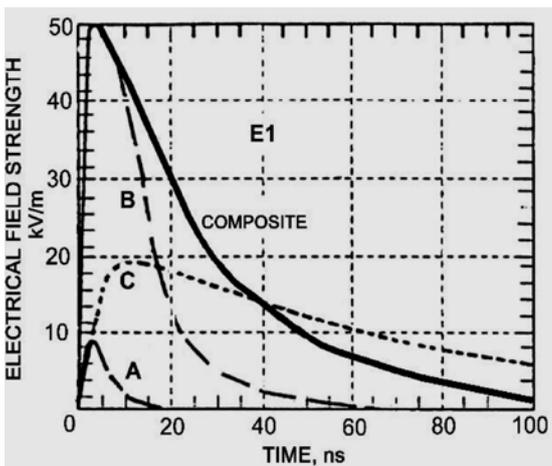


Рис.3. Типичные параметры компоненты  $E_1$ .

Компонента  $E_1$  вызывает большие перенапряжения в электрических цепях объекта и обуславливает большинство повреждений электронного оборудования. Обычные разрядники, эффективные для защиты от атмосферных грозовых перенапряжений (характерные времена 1÷100 мкс) не успевают сработать и осуществить необходимую защиту оборудования.

Импульс  $E_2$  по скорости нарастания и длительности компонент ЭМИ ЯВ находится в интервале от 100 до 1000 мкс (рис.2.а). Его параметры схожи с импульсами, возникающими при близком от объекта разряде молнии. Напряженность может достигать 100 кВ/м. Из-за сходства параметров импульса с молнией считается, что защита от  $E_2$  достаточно хорошо отработана. Однако при совместном действии  $E_1$

и  $E_2$  могут появиться дополнительные проблемы (когда защитные устройства по  $E_2$  выводятся из строя импульсом  $E_1$ ).

Компонента  $E_3$  отличается от двух других компонент ЭМИ ЯВ. Это очень медленная компонента, длящаяся десятки секунд, что обусловлено смещением и восстановлением магнитного поля Земли (рис.4). Имеется сходство с явлениями, происходящими при магнитных бурях. Может оказывать сильное влияние на протяженные электротехнические объекты (линии электропередач) [1,7, 8].

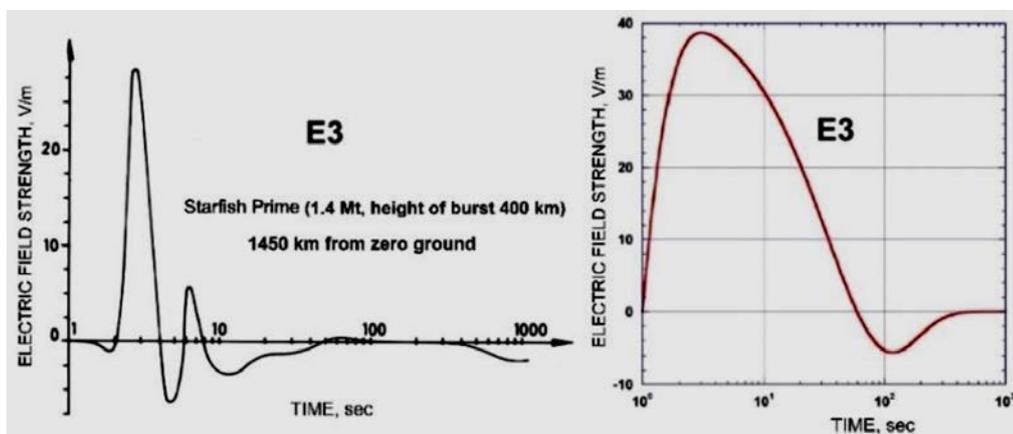


Рис.4. Типичный вид импульса  $E_3$  при высотном ЯВ.

Следует отметить, что наличие эффекта при воздействии  $E_3$  при ЯВ и степень его деструктивного влияния на электроэнергетическое оборудование до сих пор является предметом дискуссии и требует проведения дополнительных исследований.

Зона поражения от ЭМИ высотного ЯВ в зависимости от его высоты и его мощности может достигать несколько тысяч километров.

На рис.5 приведены данные по зонам поражения в зависимости от высоты ЯВ [2].

Учитывая, что доля микропроцессорной техники на объектах электроэнергетики с каждым годом увеличивается, возрастает и уязвимость этих объектов при воздействии электромагнитного импульса наносекундного диапазона техногенного характера – в том числе при высотном ЯВ [1÷3,7,8]. Связано это с тем, что резко снизился уровень допустимых электрических помех устройств элементов микроэлектроники вследствие их микроминиатюризации.

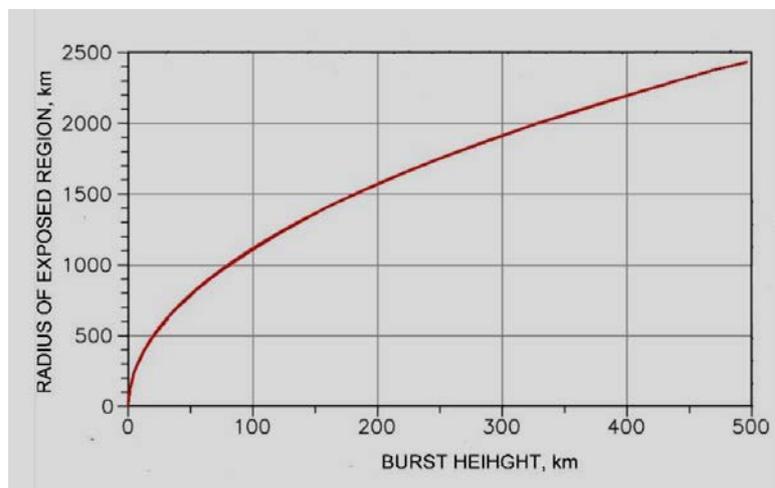


Рис.5. Размеры зоны поражения в зависимости от высоты ЯВ.

Проблемы, связанные с воздействием ЭМИ ЯВ на электронное и электротехническое оборудование, обсуждаются в специальной технической литературе уже давно [3,4,7], однако до сих пор разработке необходимых защитных системных мер (особенно гражданского энергетического оборудования) уделяется недостаточно внимания. При этом известны практические примеры повреждения оборудования инфраструктурных электроэнергетических систем при проведении испытаний устройств высотных ЯВ. Рис.6 иллюстрирует нарушения в работе инфраструктурных систем и повреждения различного оборудования при воздействии ЭМИ ЯВ (мощность 300 кТ), произведенного над Казахстаном в 1962г. [7].



Рис. 6. Повреждения технических объектов при высотном ЯВ[7].

Таким образом, имеющиеся данные (рис.6) экспериментально подтверждают большую зону разрушающего действия ЭМИ ЯВ, достигающей несколько тысяч км [7]. Особо следует отметить, что при этих испытаниях происходил электрический пробой изоляторов линии электропередачи 35 кВ. Поскольку компонента  $E_1$  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  $E_2$ . Отсюда следует, что  $E_2$  может оказывать существенное воздействие на силовое электрическое оборудование высокого напряжения. Длительность импульса  $E_2$  (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  $E_2$  (с точки зрения электрической прочности воздушной изоляции) оказывается существенно выше, 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 ЯВ, электроэнергетические системы могут оказаться неспособными сохранять работоспособность, что вызовет коллапс огромных регионов. Поэтому возникает острая необходимость в разработке основ защиты гражданской электроэнергетики.

Современный взгляд на проблему возникновения и опасности ЭМИ высотного ЯВ основан на результатах ядерных испытаний и исследований, проведенных более

50 лет назад и с тех пор существенно не изменился [2]. Гражданских стандарты по обеспечению ЭМС при ЭМИ ЯВ [4] были сформированы на основе этих результатов, 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  $E_1$ . При проведении таких испытаний электроэнергетических объектов желательно, чтобы объекты были под нагрузкой (что в настоящее время не делается), что будет наиболее адекватно отражать реальные процессы. Это позволит наиболее точно учесть все важные факторы, влияющие на работоспособность объектов при воздействии на них ЭМИ ЯВ.

Воздействие импульсов высотного ЯВ аналогично воздействиям молниевых разрядов [1,7,8]. 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 2018г 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.7,8), позволяющие проводить испытания на стойкость к ЭМИ высотного ЯВ. 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  $E_2$  ЯВ. Такое сочетание возможностей испытаний оборудования на ЭМС при воздействии ЭМИ при разряде молнии и высотного ЯВ (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.

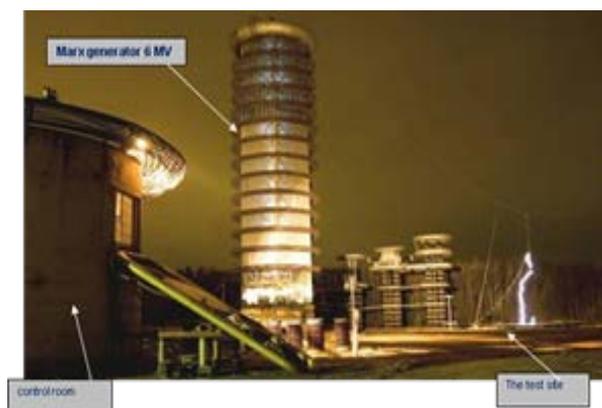
Вторая уникальная испытательная сверхвысоковольтная установка – генератор **ГИН 6МВ** (рис.8). Генератор способен формировать импульсы грозовых и коммутационных перенапряжений и может быть использован, как для серийных и тестовых испытаний электрической изоляции различных объектов, так и проведения широкомасштабных фундаментальных исследований газового разряда в длинных воздушных промежутках, физики молнии и молниезащиты.



Рис. 7. Комплексный испытательный центр РФЯЦ-ВНИИТФ (<http://www.vniitf.ru/velk-business>)



*Установка Аллюр*



*Генератор ГИН 6МВ*

Рис. 8. 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 высотном ЯВ.

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.8) 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.

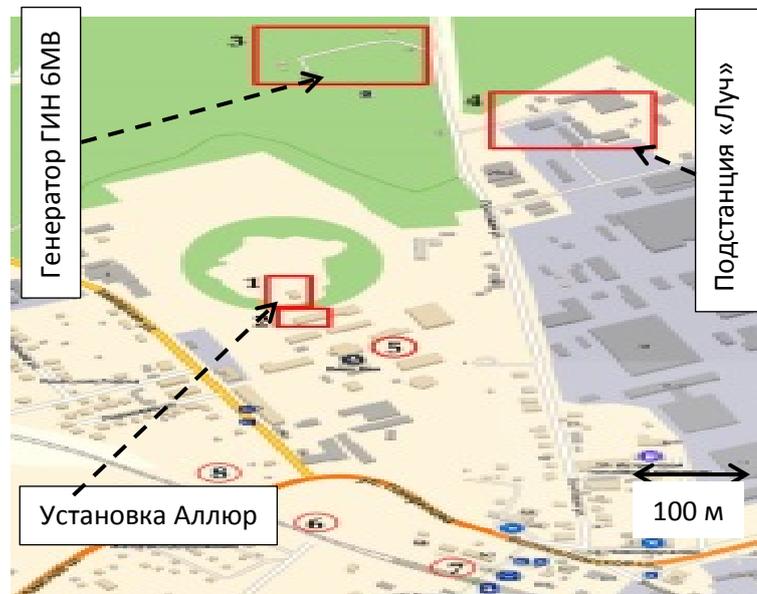


Рис.8. Схема расположения испытательных установок РФЯЦ ВНИИТФ и высоковольтной подстанции «Луч» ФСК РФ.

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 ЯВ, 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 применение некоторых мер может существенно повысить степень защищенности. Например, наряду с процессом применения новых средств коммутации и использованием микропроцессорной техники, интеллектуальной релейной защиты и автоматики, внедрением новых прогрессивных методов управления и т.д., желательно сохранить в качестве «горячего резерва» шкафы управления, релейной защиты и автоматики, основанные на «старых» принципах работы. В частности, целесообразно использовать оборудование на принципах работы электромагнитных реле, имеющими существенно более высокий порог защищенности от электромагнитных помех, с возможностью их параллельного (байпасного) присоединения к шкафам, выполненным по технологиям цифровой энергетики.

## **Заключение**

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 их электромагнитная совместимость при возможном высотном ЯВ в настоящее время следует уделить 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. Необходимо создавать испытательные установки, позволяющих проводить полигонные испытания на стойкость к ЭМИ ЯВ электротехнического оборудования. Учитывая, что это является очень дорогостоящим и длительным мероприятием, целесообразно восстанавливать и использовать имеющиеся установки для создания таких полигонов.
3. Целесообразно создание 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. Необходимо разработать предложения 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. Необходимо совершенствовать государственные стандарты и нормативно правовую базу 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. IEC 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 HEMP 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., Щербаков 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. В 5 томах. Том 2. Действие взрыва Под редакцией Шилобреева Б.А.,Изд.физматлит., 2010, 620с.