

1. Глава 1. Физика развития и параметры ЭМИ Equation Chapter 1 Section 1

1.1 Электромагнитный импульс ядерного взрыва

1.1.1 Исторические аспекты развития проблемы

С начала XX века происходит стремительное развитие различного электротехнического и радиоэлектронного оборудования. Его использование в различных сферах человеческой деятельности дает огромный эффект, значение которого трудно переоценить. Этот процесс продолжается в настоящее время все более возрастающими темпами.

Широкое внедрение электротехнических и радиоэлектронных средств (РЭС) приводит к возрастанию уровней электромагнитных полей, создаваемых ими в окружающем пространстве. Эти поля являются помехами для других подобных устройств, ухудшая условия их функционирования и снижая эффективность применения. В этом процессе нетрудно увидеть характерные черты диалектического развития: прогресс в данной области техники стал все более сдерживаться отрицательными явлениями, порожденными ее количественным ростом. Дальнейший прогресс требует преодоления этой тенденции, т. е. развития на новом качественном уровне, заключающемся в обеспечении совместного функционирования различных средств. Относительно новое направление радиоэлектроники, призванное обеспечить одновременную и совместную работу различного радиотехнического, электронного и электротехнического оборудования получило название электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС).

Обеспечение совместной работы РЭС относится к одной из наиболее актуальных проблем техники, так как продолжающийся процесс развития электротехники и радиоэлектроники усиливает зависимость результатов применения новых средств от условий их совместного функционирования. Перечислим наиболее существенные причины, вызывающие обострение проблемы ЭМС:

- возрастает общее число одновременно действующих радиотехнических устройств, в особенности устанавливаемых на подвижных объектах;
- повышается мощность радиопередатчиков, достигая для некоторых типов радиосредств десятков мегаватт;
- расширяются полосы частот, используемые многими современными радиосредствами;
- увеличивается загрузка диапазона радиочастот, несмотря на то, что многие участки его уже в настоящее время сильно загружены;

- непрерывно повышается быстродействие электронных средств автоматического управления, контроля, диагностики и т.д. на основе аналоговой и особенно цифровой техники, в частности микро-ЭВМ и микропроцессоров. Такие средства становятся источниками непреднамеренных помех и одновременно более чувствительны к их воздействию;
- возрастает оснащенность подвижных объектов средствами радиоэлектроники, в особенности кораблей и самолетов, при увеличивающейся плотности компоновки аппаратуры;
- ухудшаются условия функционирования радиосредств, установленных на летательных аппаратах, поскольку они оказываются в зоне прямой видимости возрастающего числа наземных радиосредств, расположенных на значительной территории.

На ранних этапах развития техники обеспечение совместной работы средств решалось в основном путем совершенствования отдельных схемных и конструкторских решений и планирования распределения радиочастот, используемых отдельными радиосредствами. В настоящее время принятия отдельных частных мер уже недостаточно, а проблема в целом имеет ярко выраженный системный характер. Учет требований ЭМС необходим на всех стадиях жизненного цикла любого радиоэлектронного оборудования. Неправомерно отделение во времени вопросов разработки и создания конкретного РЭС и обеспечения его совместимости с другими РЭС в процессе эксплуатации. Если аспекты ЭМС игнорируются до тех пор, пока не приведут к нарушению совместимости аппаратуры, обеспечение ЭМС РЭС будет дорогостоящим и неудовлетворительным.

Проблема электромагнитной совместимости стала к настоящему времени в ряд важнейших проблем радиоэлектроники. Стало ясно, что невозможно заниматься проектированием, созданием и эксплуатацией РЭС различного назначения без учета условий их ЭМС. Каждый специалист в области радиоэлектроники должен знать принципы обеспечения ЭМС РЭС и использовать эти знания в практической деятельности. Поэтому стало необходимо включение вопросов ЭМС в процесс профессиональной подготовки радиоинженера.

Этим целям призвана служить новая учебная дисциплина «Мощный электромагнитный импульс: параметры, воздействие на электронные средства и методы защиты», рекомендованная к включению в учебные планы для ряда категорий вузов. Данная дисциплина является новой в системе подготовки специалистов по радиоэлектронике. Ее методология не сформирована еще в такой мере, как в признанных, ставших классическими, дисциплинах, например «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» «Радиоприемные устройства», «Антенны и устройства СВЧ», «Системы передачи

информации» и т. п. Одной из основных причин является значительный опыт, накопленный при решении практических задач ЭМС. Другая причина связана с имевшей до недавнего времени тенденцией к недооценке роли ЭМС со стороны высшей школы. Наконец, сложность формирования этой учебной дисциплины связана с комплексным характером проблемы в целом. При рассмотрении ЭМС должен охватываться чрезвычайно широкий круг вопросов — от параметров ЭМС и воздействующих электромагнитных импульсов (ЭМИ), методов и средств защиты с учетом специфических особенностей радиотехнических систем до конструирования и технологии производства, причем с учетом технических, экономических, метрологических и организационных аспектов. Поэтому вряд ли возможно такое содержание дисциплины, которое в равной мере соответствовало бы всем существующим схемотехническим, системотехническим и конструкторским специальностям. Ее содержание и объем для этих специальностей должны быть существенно различными.

В настоящее время имеется значительное число источников информации по проблеме ЭМС — монографии, многочисленные журнальные публикации, труды научно-технических конференций, а также различные нормативные документы. Самостоятельно разобраться в большом объеме сведений неподготовленному читателю чрезвычайно сложно. Поэтому назрела необходимость в учебной литературе по вопросам ЭМС, дифференцированной в соответствии со специализацией, принятой в радиоэлектронике. Данная книга может рассматриваться как учебное пособие, предназначенное для соответствующих специальностей вузов радиотехнического профиля. Она задумана для первоначального изучения параметров мощного ЭМИ, механизма его воздействия на аппаратуру и средств защиты от его деструктивных последствий. Предполагается, что читатель знаком с основами теории радиотехнических цепей и сигналов, радиопередающих и радиоприемных устройств, антенн и устройств СВЧ, радиосистем, систем передачи информации, основами проектирования радиоэлектронных средств, а также владеет математическим аппаратом в объеме программы радиотехнического вуза.

Содержание книги определили вопросы, предусмотренные программой курса «Мощные импульсные электромагнитные воздействия на радиоэлектронные средства», который читается, в частности, в МИЭМ и в системе повышения профессионального мастерства для инженеров. В результате изучения данной дисциплины слушатель должен знать причины возникновения ЭМИ, свойства и характеристики различных элементов РЭС, влияющие на процессы создания помех и подверженности им, принципы, основные методы и средства оценки стойкости к ЭМИ, принципы и основные направления обеспечения защиты от ЭМИ, а также иметь ясное представление об организационных аспектах, стандартах и нормативных документах в области ЭМИ. Изучение данной дисциплины должно развить

убеждение в необходимости учета различных характеристик РЭС в широкой полосе частот и неполноты, а в ряде случаев даже ошибочности критериев, основанных на оценке поведения устройств только ближайшей окрестности рабочих полос частот, а также знания различных факторов, влияющих на РЭС. Изучение данной дисциплины должно способствовать выработке системы взглядов, по различным электромагнитным факторам природного и техногенного происхождения.

В настоящее время разработан комплекс стандартов МЭК 61000, в котором определены параметры ЭМИ высотного ядерного взрыва (ВЯВ), методы, средства испытаний и концепция защиты. Для российских производителей радиоэлектронных средств и учебных заведений, которые готовят специалистов по соответствующим специальностям, эти стандарты имеют весьма большое значение по следующим причинам.

Россия готовится к присоединению к Всемирной торговой организации (ВТО). В условиях членства России в ВТО явится необходимость соблюдать при разработке и изготовлении технических средств общепринятые на международном уровне установленные требования по ЭМИ и выполнять установленные процедуры подтверждения соответствия. Указанные требования будут в одинаковой степени выполняться для продукции, предназначенной как для внутреннего рынка, так и на экспорт.

Если разрабатываемые и изготавливаемые отечественными предпринимателями технические средства не будут соответствовать требованиям ЭМИ ВЯВ, принятым на международном уровне, невозможно будет обеспечить конкурентоспособность отечественной продукции в условиях членства России в ВТО.

Невозможно будет также без развития экспериментально-испытательной базы (ЭИБ) подтвердить соответствие требованиям ЭМИ для допуска продукции к обращению на рынке.

В этой связи перед отечественной промышленностью возникают серьезные проблемы, связанные с тем, что международные стандарты по ЭМИ устанавливают для технических средств народнохозяйственного применения весьма жесткие требования, которые, во многих случаях, являются новыми для российской промышленности и испытательных лабораторий. Кроме этого следует учесть, что

- стандарты МЭК представляют собой обобщение и систематизацию мирового опыта,
- стандартизация в России по ЭМИ ВЯВ отстала от мирового опыта по объективным причинам,
- зарубежные фирмы, конкурирующие с отечественными предприятиями, во многих случаях обладают опытом решения задач, относящихся к проектированию, конструированию и серийному производству технических средств, отвечающих

современным требованиям по ЭМИ и выполнению процедур подтверждения соответствия,

- подготовка руководящего и технического персонала отечественных предприятий, а также организация учебного процесса в ВУЗах по вопросам разработки, конструирования и изготовления технических средств, отстают от современных требованиям по ЭМИ.

Настоящее учебное пособие, состоящее из 7 частей, не является полным завершением работы по данной проблеме. В нем отражены основные итоги определенного этапа в решении проблемы защиты РЭС от электромагнитных излучений, имеющих важное научное и практическое значение. Ряд задач требует еще своего решения, в том числе на базе новых информационных технологий. К ним, например, можно отнести задачи по защите информации и разработке автоматизированных систем, устойчивых к намеренным силовым электромагнитным воздействиям.

1.1.2 Электромагнитный импульс ядерного взрыва

Поиск и освоение новых источников энергии всегда относили к приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных исследований. В первой трети XX века бурными темпами развивались исследования строения атома и атомного ядра. Опираясь на достижение в этой области, ряд ведущих физиков мира уже в 1939 г. обосновали возможность протекания в уране цепной реакции деления ядер, а следовательно, возможность практического использования принципиально нового источника энергии (Л. Сциллард, Э. Ферми, Ф. Жолио-Кюри, Я.Б. Зельдович, Ю.Б. Харитон и др.). Вскоре после этого были сформулированы условия реализации ядерной реакции взрывного типа с выделением большого беспрецедентного количества энергии. Это означало, что ученые подошли к порогу создания оружия необычайно разрушительной силы [1.1].

К концу 40-х годов в США и СССР были сделаны первые шаги в решении проблем обеспечения условий развития ядерной реакции взрывного типа и создания ядерного оружия. Научные и технологические достижения по указанным проблемам до сих пор являются военной и государственной тайной стран, владеющих ядерным оружием. Международные соглашения строго регламентируют публикации и запрещают передачу другим странам технологий, относящихся к производству ядерного оружия.

Однако ядерный взрыв – это также уникальное физическое явление, изучение которого представляет интерес для ученых самых разных областей знаний. Даже, если исключить из рассмотрения стадию развития ядерной реакции и энерговыделения в конструкции ядерного взрывного устройства, то остается такой широкий перечень физических процессов, который охватывает практически все разделы современной физики. И все же до недавнего времени интерес к изучению названных физических процессов

стимулировался главным образом тем, что они выступают в качестве поражающих факторов для военной техники, сооружений и личного состава войск. В связи с этим, с одной стороны, постоянно росли требования к точности, определения законов поражения перечисленных объектов со стороны военных, а с другой – требования к детализации характеристик (параметров) поражающих факторов в различных условиях проведения взрыва со стороны разработчиков вооружения и военной техники. Из-за ограничения испытания ядерного оружия в последнее десятилетие выполнение этих требований в основном обеспечивалось разработкой максимально строгих физических и математических моделей процессов, сопровождающих развитие ядерного взрыва. Использование последних достижений фундаментальных исследований в различных областях физики и вычислительной математики, в конечном счете, определило высокий уровень созданного научно-методического аппарата и глубокое проникновение в суть физических процессов, сопровождающих развитие ядерного взрыва, что, несомненно, представляет общенаучный интерес [1.1 – 1.6].

Еще до первых испытаний ученые прогнозировали основные физические процессы, которые, по их представлению, должны сопровождать развитие ядерного взрыва, а также соответствующие им поражающие факторы и примерные значения их характеристик. При этом исходили, во-первых, из принципиально иного характера источника энергии в сравнении с взрывом химического взрывчатого вещества и, во-вторых, из уникальных условий протекания реакции: гигантское энерговыделение (эквивалент – десятки килотонн тротила, а затем – десятки мегатонн), малый объем зоны энерговыделения и короткое время реакции (десятки наносекунд). Вначале главное внимание было обращено на ударную волну как основной поражающий фактор. Предполагалось, что параметры ударной волны, за исключением амплитуды в ближней зоне, будут незначительно отличаться от характеристик ударной волны взрыва химических взрывчатых веществ. Более значительные отличия ожидалось для светового излучения – высокая доля энергии взрыва, расходуемая в виде светового излучения (при взрыве химического взрывчатого вещества эта доля незначительна), а также принципиальное ужесточение спектра светового излучения. Еще больших отличий от взрыва химического взрывчатого вещества ожидали в масштабе и характере протекания газодинамических процессов и развития пылевых образований. Естественно, чем большие ожидалось отличия, тем менее определенным был прогноз.

Тем не менее, до первых взрывов были высказаны также некоторые прогнозы по характеристикам проникающей радиации (нейтронам, гамма-излучению) и радиоактивному загрязнению воздуха и поверхности земли, которые присущи только ядерному взрыву. В последние годы перечень исследуемых физических процессов был расширен, прежде всего,

за счет таких ожидавшихся процессов, как сейсмозрывная волна в грунте при контактном или подземном взрыве и ударная волна в воде при подводном взрыве. Однако были обнаружены новые, свойственные только ядерному взрыву процессы, оказавшиеся впоследствии тоже поражающими факторами: электромагнитный импульс (ЭМИ) радиочастотного диапазона, рентгеновское излучение и обширные ионизированные области. Экспериментальные данные подтвердили, что ЭМИ обладает выраженной спецификой воздействия на технические средства и объекты в полете, на поверхности земли и в грунте и поэтому заслуживает самостоятельного рассмотрения [1.6].

Опыт работы и эксплуатации современных технических средств связи, систем учета и планирования, интеллектуальных зданий показывает, что одной из наиболее сложных проблем при их создании является обеспечение их устойчивой работы в условиях воздействия мощных электромагнитных помех (излучений) естественного и искусственного происхождения [1.7 – 1.23].

В отличие от радиопомех и шумов воздействие мощных электромагнитных помех (МЭМП) может вызвать нарушение функционирования широкого класса гражданских объектов в результате наведения во внешних и внутренних цепях импульсных напряжений и токов больших интенсивностей.

Основными источниками мощных электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения являются: грозовые разряды, мощные радиопередающие средства (РПС) и радиолокационные станции (РЛС), высоковольтные линии электропередач (ВЛЭП), контактная сеть железных дорог (КСЖД) и т.д.

Наиболее мощным искусственным источником электромагнитного излучения является ядерный взрыв (ЯВ). Импульсные электромагнитные поля, возникающие при ядерном взрыве, принято называть *электромагнитным импульсом ядерного взрыва* (ЭМИ ЯВ).

Качественное переоснащение отечественных систем связи, управления и контроля современной компьютерной техникой, повышение требований по стойкости к действию различных электромагнитных полей на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) приводит к тому, что в современных условиях проблема воздействия ЭМИ ЯВ на системы, средства связи и управления становится одной из ключевых.

Особенно актуально на настоящий момент стоит вопрос о защите средств связи от воздействия ЭМИ ЯВ, при котором наблюдаются высокие уровни воздействующих электромагнитных полей (десятки-сотни киловольт на метр и сотни ампер на метр) на удаленностях от центра взрыва, достигающих сотен и даже тысяч километров. Сегодня ЭМИ

является практически единственным поражающим фактором, способным выводить из строя современные системы связи и управления на очень больших расстояниях.

Проблеме исследования параметров, воздействия ЭМИ ЯВ на радиоэлектронные системы и разработке мер по их защите посвящены работы целого ряда известных ученых России, США, Швеции и других стран. В их работах получены основополагающие результаты в области параметров и поражающего действия ЭМИ на РЭА, разработаны методы расчета и нормативные документы по оценке воздействия ЭМИ ЯВ на объекты и выбору средств защиты. Были достигнуты определенные успехи в решении задач анализа стойкости технических систем, создании методов измерений и экспериментальной проверки методик расчета, наведенных ЭМИ токов и напряжений в кабельных линиях, экранах и антеннах.

Анализ состояния исследований за рубежом свидетельствует, что научные организации США, Франции, Германии, Швейцарии, Китая и др. стран уделяют этому вопросу большое внимание: имеются модели взаимодействия ЭМИ с объектами и методы расчета, доведенные до машинных программ. Исследования ведутся применительно к системам связи, электроснабжения и различных систем гражданских объектов.

В связи с постоянным совершенствованием ядерных боеприпасов, уточнением физики процессов меняются и параметры воздействующих факторов, что приводит к необходимости развития математических моделей взаимодействия, методов расчета воздействия ЭМИ на РЭА, а также совершенствование методов обеспечения стойкости.

В последние годы развернулись исследования по созданию оружия на основе применения ЭМИ (ЭМИ-оружия) с повышенным выходом электромагнитных излучений. Поэтому параметры ЭМИ в течение 80 – 90-х годов неоднократно видоизменялись, и в настоящее время они существенно отличаются от ранее известных и стандартизованы в сторону ужесточения.

Учитывая важность проблемы ЭМИ, Международная электротехническая комиссия (МЭК) выступила с инициативой объединить результаты исследований ученых этих стран и на их основе разработать требования к защите важных для каждой страны систем связи, информационных сетей и линии электропередач, обеспечивающих безопасность функционирования промышленности и управления страной.

1.1.3 Состояние проблемы и направления исследований

При рассмотрении поражающего действия ЭМИ высотного ядерного взрыва (ВЯВ) на современные радиоэлектронные средства можно сформулировать основную проблему, которая заключается в необходимости защиты объектов гражданского назначения от

действия мощных импульсных электромагнитных полей высотного ядерного взрыва и поддержания электронных средств в работоспособном состоянии.

Эта проблема решается более 40 лет с момента запрещения испытаний ядерного оружия в трёх средах. До 1962 года высотные ядерные взрывы проводили США и СССР. Полученный богатый экспериментальный материал использовался для уточнения физики образования взрыва и электромагнитного импульса, моделей расчёта его воздействия на радиоэлектронные средства и разработки новых методов и средств воспроизведения импульса. Эта проблема фундаментальна, актуальна, сложна и многогранна. Ее решение базируется с одной стороны на фундаментальных исследованиях физики ядерного взрыва, полей ЭМИ, механизмов их взаимодействия с объектами, а с другой стороны на возможностях методов воспроизведения, испытаний и существующих средств защиты. В полной мере она до сих пор не решена. Уточняется физика процессов, продолжаются теоретические исследования и экспериментальные испытания объектов на имитаторах ЭМИ.

Для того, чтобы понять всю сложность проблем угрозы ЭМИ и мер по защите от его действия, необходимо рассмотреть современное состояние знаний о ЭМИ как физическом явлении, а также экспериментальные данные в этой области. Следует принимать во внимание, что в экспериментах количественные характеристики импульса по ряду причин измерялись приближенно. Во-первых, отсутствовала контрольно-измерительная аппаратура, способная регистрировать чрезвычайно мощное электромагнитное излучение, существующее очень короткое время (миллионные доли секунды). Во-вторых, на ранних стадиях проведения исследований в радиоэлектронной аппаратуре использовались исключительно электровакуумные приборы, которые мало подвержены воздействию ЭМИ, что снижало интерес к его изучению.

Создание полупроводниковых приборов, а затем и интегральных схем, особенно устройств цифровой техники на их основе, и широкое внедрение этих средств в радиоэлектронную военную аппаратуру заставили специалистов по иному оценить угрозу ЭМИ. С 1970 года вопросы защиты сооружений и военной техники от ЭМИ стали рассматриваться ведущими странами мира как имеющие высшую приоритетность [1.7 – 1.10].

Широкое распространение микроэлектроники в современных информационных системах учёта, управления и регулирования приводит к возрастанию вероятности отказов ответственных систем управления и связи при воздействии электромагнитного импульса ядерного взрыва и электромагнитных факторов природного и техногенного происхождения (грозовых разрядов, разрядов статического электричества,

электромагнитных полей радиопередающих и радиолокационных станций, высоковольтных линий электропередач). Поэтому актуальными в этих условиях становятся проблемы защиты информационных ресурсов, оценка устойчивости гражданских объектов и обеспечение функциональной безопасности информационных и телекоммуникационных систем. Поэтому для разработчиков перспективных радиоэлектронных средств важно знать физику развития ЭМИ высотного ядерного взрыва, их параметров, механизмов воздействия на технические средства, методов воспроизведения и испытаний. Эти знания позволяют обосновано разрабатывать средства защиты, которые должны обеспечить стойкость технических средств к воздействию ЭМИ ЯВ.

1.1.4 Физика образования и общая характеристика ЭМИ наземного ядерного взрыва

Причиной возникновения ЭМИ радиочастотного диапазона могут оказаться многие физические процессы, протекающие при развитии ядерного взрыва. Наиболее значимым механизмом считаются взаимодействие гамма- и рентгеновского излучений с веществом окружающей взрыв среды, что сопровождается переносом заряда вторичными электронами, взаимодействием заряженных частиц или расширяющейся светящейся области с геомагнитным и геоэлектрическим полями, процессами в зоне высоких градиентов термодинамических характеристик газа в тепловой и ударной волнах, тепловое излучение неравновесных электронов проводимости [1.1 – 1.4].

Уже на ранней стадии исследований, по результатам первых натуральных экспериментов было высказано предположение, что при наземном взрыве основным механизмом формирования ЭМИ является перенос быстрых вторичных электронов, образующихся за счет взаимодействия гамма-квантов взрыва с воздухом. Поскольку преобладает комптоновский тип образования быстрых электронов гамма-квантами, этот механизм назвали комптоновским. Быстрые электроны обладают диаграммой направленности, вытянутой в сторону движения гамма-квантов. Направление движения этих электронов, во-первых, создает в окрестностях взрыва довольно значительный ток (часто его называют сторонним током) и, тем самым, инициирует разделение зарядов и формирование радиального электрического поля – радиального компонента электромагнитного импульса. Зависимость интенсивности P_γ гамма-излучения от времени для высотного и наземного ядерного взрыва представлена на Рис. 1.1.

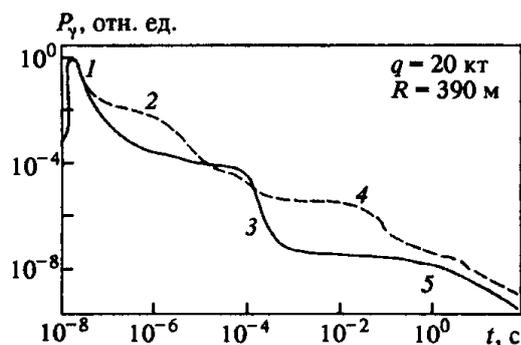


Рис. 1.1. Временная форма гамма-излучения высотного (сплошная линия) и наземного (штриховая линия) атомного взрыва: 1 – мгновенный компонент; 2 – гамма-излучение, рождаемое при неупругом рассеянии нейтронов; 3 – изомерное излучение; 4 – излучение, рождаемое при захвата нейтронов; 5 – осколочное излучение (мощность взрыва 20 кт, удаление от места взрыва 390 м)

На Рис. 1.2 в качестве примера приведена форма радиальной компоненты E_r ЭМИ на различном удалении R , которая создана гамма-излучением, форма которого представлена на Рис. 1.1. Как следует из анализа этих данных, видно, во-первых, что на расстоянии 390 м от центра наземного взрыва напряженность электрического поля может приближаться к сотне киловольт на метр. Во-вторых, комптоновские электроны совместно с фотоэлектронами производят интенсивную ионизацию молекул азота и кислорода, создавая значительную радиационную проводимость воздуха. Поскольку в воздухе одновременно формируется отмеченное выше радиальное электрическое поле, под его действием появляется ток проводимости, направленный навстречу стороннему току и уменьшающий (ограничивающий) соответственно амплитуду формируемого электрического поля. В результате этого процесс формирования ЭМИ принципиально оказывается нелинейным. Ввиду важной роли радиационной проводимости воздуха и значительной длительности ее существования по сравнению со сторонним током, форма ЭМИ не повторяет полностью форму импульса гамма-излучения. Особенно наглядно это проявляется в случае формирования ЭМИ при взрыве устройства с двухстадийным развитием взрыва и двухпиковой структурой многомерного гамма-излучения: при соотношении пиков в импульсе гамма-излучения примерно 1:10 амплитуда первого пика ЭМИ, как правило, меньше второго всего в 2...3 раза.

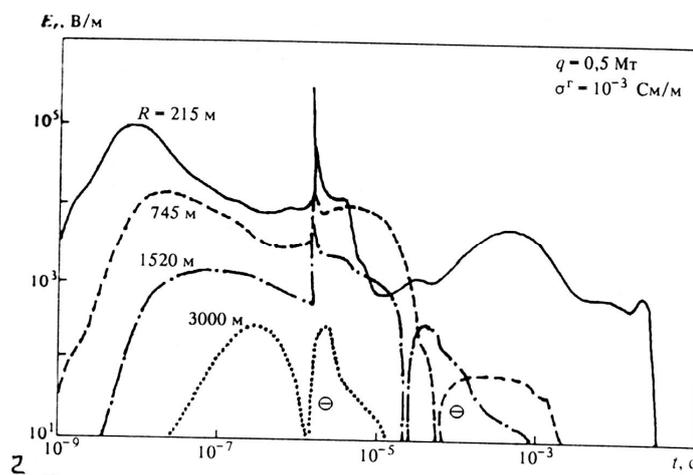


Рис. 1.2. Импульсы напряженности реального электрического поля на различных расстояниях r от центра контактного взрыва (мощность взрыва 0,5 Мг, проводимость грунта 10^{-3} См/м)

Несмотря на значительную временную задержку, вторичные компоненты гамма-излучения тоже принимают определенное участие в формировании ЭМИ наземного взрыва, так как амплитуда этих компонентов при наземном взрыве очень велика. За счет этого временная форма ЭМИ наземного взрыва оказывается растянутой до миллисекундной области и приобретает сложную, подчас многопиковую структуру.

Если бы взрыв развивался в идеально симметричных условиях, ЭМИ был бы локализован зоной распространения гамма-излучения, ограниченной 2...3 км от центра взрыва. При наземном взрыве основной причиной нарушения симметрии выступает Земля. Граница раздела воздух-грунт является границей двух сред с существенно отличающимися условиями распространения как гамма-излучения, так и электронов, а следовательно, условиями формирования ЭМИ. Поэтому при наземном взрыве любого ядерного устройства, в окрестностях взрыва (часто говорят – в зоне источника ЭМИ) формируются тангенциальные составляющие тока, которые выступают в качестве источника излученного ЭМИ, распространяющегося в атмосфере подобно обычному радиосигналу. Кроме того, при формировании ЭМИ наземного взрыва, важную роль играет проводимости σ_{gnd} грунта (во влажном грунте удельная проводимость достигает 10^{-2} См/м). За счет этого в грунте под действием радиального электрического поля протекает весьма значительный ток, генерирующий азимутальное магнитное поле до 3...5 кА/м (при взрыве в однородном воздухе магнитное поле в ближней зоне вообще не образуется).

За пределами зоны источника ЭМИ характеристики электрического поля полностью определяются характеристиками азимутального магнитного поля. При этом амплитуда напряженности E_r электрического поля убывает обратно пропорционально расстоянию; она же логарифмически зависит от мощности взрыва, а зависимость от проводимости

грунта остается прежней

$$E_r \approx \frac{1}{\sqrt{\sigma_{gnd}}} \quad (1.1)$$

Пространственно-временное распределение напряженности H_ϕ магнитного поля, формирующего в окрестности контактного ядерного взрыва, показано на Рис. 1.3, Рис. 1.4 [1.1]. По сравнению с импульсом радиального электрического поля магнитное поле имеет большую длительность (до 1...10 мс), так как хорошо проводящий грунт и воздух препятствуют уходу энергии магнитного поля из окрестности границы раздела воздух-земля.

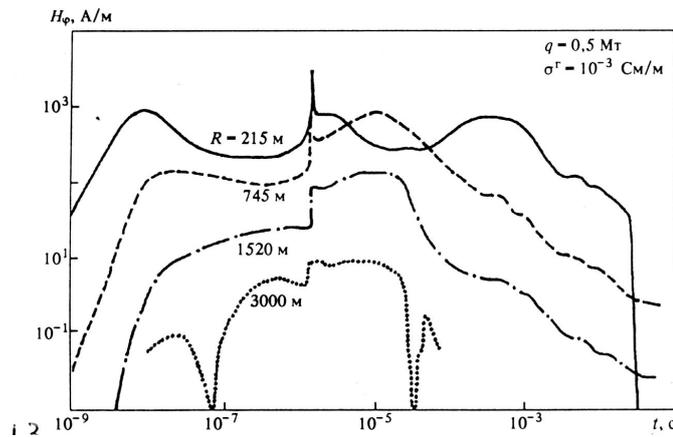


Рис. 1.3. Импульс напряженности магнитного поля на различных расстояниях r от центра контактного взрыва (мощность взрыва 0,5 Мт, проводимость грунта 10^{-3} См/м)

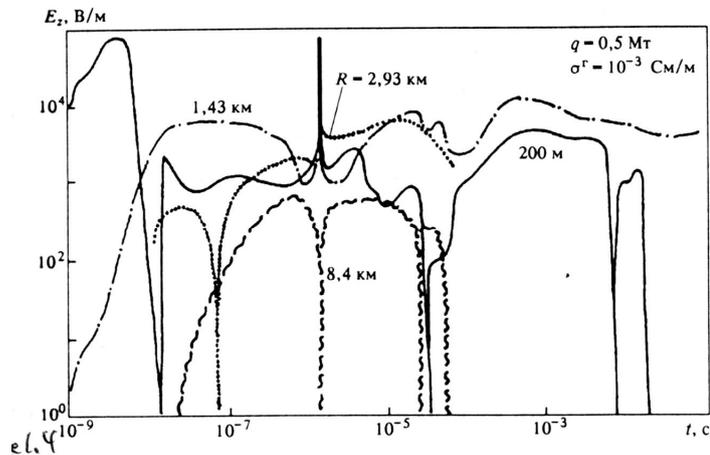


Рис. 1.4. Импульсы напряженности вертикальной составляющей электрического поля в воздухе на различных расстояниях r от центра контактного взрыва (мощность взрыва 0,5 Мт, проводимость грунта 10^{-3} См/м)

Вертикальное электрическое поле E_z в воздухе является наиболее долгоживущим компонентом ЭМИ (Рис. 1.4). Его длительность достигает десятков миллисекунд. Характерный высокочастотный всплеск, который наблюдается в окрестности максимума мгновенного гамма-излучения, имеет амплитуду 100 кВ/м и длительность близкую к

времени нарастания интенсивности мгновенного гамма-излучения до максимума. Максимальное значение вертикального электрического поля в воздухе в ближней зоне наземного ядерного взрыва практически не зависит от расстояния и проводимости грунта.

С подъемом точки взрыва до высоты 200...500 м интенсивность поля ЭМИ в некоторой области вблизи эпицентра мощного взрыва может возрасти за счет особенностей взаимодействия стороннего тока, сформировавшегося в воздухе, с грунтом. В то же время, излученный компонент ЭМИ заметно уменьшается, что объясняется постепенным удалением такого существенного источника асимметрии распространения гамма-излучения, как граница раздела воздух - грунт.

При дальнейшем подъеме точки взрыва на первый план выступает асимметрия за счет неоднородности плотности воздуха по высоте в пределах пробега гамма-квантов, которая, однако, не столь значительна, особенно до высоты 10...15 км. Подъем точки взрыва за пределы этой высоты ведет к существенному увеличению пробега комптоновских электронов и появлению еще одного мощного фактора асимметрии распространения электронов – геомагнитного поля. Он снова значительно увеличивает излученный компонент ЭМИ, но это уже фактически новый механизм формирования ЭМИ [1.4].

1.1.5 ЭМИ высотного ядерного взрыва

В процессе формирования ЭМИ радиочастотного диапазона участвуют все составляющие ионизированных излучений ядерного взрыва: мгновенное гамма-излучение (прямое и рассеянное), рентгеновское излучение, запаздывающее гамма-излучение радионуклидов, а также гамма кванты и заряженные частицы, возникающие при неупругом рассеянии нейтронов на ядрах воздуха, что и определяет, в конечном счете, амплитудно-временные характеристики ЭМИ. Физический механизм такого преобразования энергии состоит в следующем.

Гамма-кванты взаимодействуют с атомами воздуха, выбивая из них быстрые комптоновские и фотоэлектроны. Движение электронов вдоль распространения гамма-квантов (*сторонний ток*) приводит к поляризации среды и возникновению радиального электрического поля. Поскольку основной вклад в сторонний ток создают комптоновские электроны, механизм образования ЭМИ за счет взаимодействия гамма-квантов с воздухом получил название *комптоновского*. Быстрые электроны, в свою очередь, производят ионизацию среды, создав медленные вторичные электроны и положительные ионы, в результате чего воздух в зоне поглощения гамма-квантов становится проводящим. Под действием электрического поля поляризации в проводящем воздухе возникает *ток проводимости* (индукционный ток), стремящийся компенсировать первоначальное

радиальное электрическое поле. Напряженность результирующего поля определяется соотношением между сторонним током и током проводимости.

В реальных условиях пространственное распределение стороннего тока и тока проводимости оказывается несимметричным, что приводит к появлению электромагнитного излучения, распространяющегося из зоны источника ЭМИ (области пространства, занятой током или проводящим воздухом) на значительные расстояния. При высотном взрыве в качестве фактора асимметрии выступают геомагнитное поле, неоднородная плотность атмосферы по высоте, анизотропный выход проникающих излучений из ядерного взрывного устройства.

Оценка амплитуды радиального электрического поля в зоне поглощения гамма-квантов (зона источника), полученная из условия равенства тока проводимости и стороннего тока равна примерно 450 кВ/м. Эта оценка является весьма ориентировочной. Оценки для радиального электрического поля в зоне поглощения рентгеновского излучения (высота 60 км) говорят о возможности возникновения плазменных колебаний с частотой $10^8 \dots 10^{12}$ Гц и амплитудой до 20...30 кВ/м на расстоянии 10...20 км от центра взрыва мегатонного класса.

Геомагнитное поле искривляет траекторию движения быстрых электронов, делая ее похожей на винтовую линию, навивающуюся на силовую линию магнитного поля. Возникающее за счет силы Лоренца центростремительное ускорение является причиной электромагнитного излучения *магнитотормозного* типа, которое распространяется перпендикулярно вектору ускорения в узком телесном угле вдоль направления скорости быстрого электрона.

Физическим пределом излученного ЭМИ для энергии гамма-квантов 1,5 МэВ является амплитуда поля 160 кВ/м, которая достигается в непроводящем воздухе при равенстве действующих на электрон сил, создаваемых геомагнитным и генерированными полями. В случае учета тока проводимости по ионизированному воздуху амплитуда поперечного поля снижается до 75 кВ/м [1.5].

Уменьшение плотности атмосферы с высотой ведет к появлению зависимости стороннего тока и тока проводимости от полярного угла. В результате при наличии осевой симметрии возникает некомпенсированный вертикальный электрический ток, который генерирует поле, эквивалентное полю вертикального электрического диполя. Механизм образования электромагнитного поля излучения за счет неоднородной плотности атмосферы называется *барометрическим*.

С асимметрией выхода проникающих излучений из ядерного взрывного устройства связано появление излучателя электрического типа, ось которого ориентирована вдоль

оси индикатрисы выхода излучений. В большинстве работ по излученному ЭМИ высотного взрыва в качестве факторов асимметрии рассматриваются только геомагнитное поле и неоднородная атмосфера.

Следует отметить еще одну особенность формирования ЭМИ высотного ядерного взрыва. Это большой масштаб источника ЭМИ в горизонтальном направлении, который определяется радиусом зоны прямой видимости поверхности земли из центра взрыва. Радиус R этой зоны в километрах (расстояние вдоль поверхности земли от эпицентра взрыва до границы зоны) определяется соотношением:

$$R = 113\sqrt{h}, \quad (1.2)$$

где h – высота взрыва, км.

Остановимся на механизме генерации *магнитогидродинамического* ЭМИ (МГД-ЭМИ). В его основе лежат магнитогидродинамические эффекты взаимодействия плазмы продуктов ядерного взрыва и разогретого ионизированного воздуха с магнитным полем Земли. Различают две фазы МГД-ЭМИ, обусловленные несколько отличающимися механизмами образования.

Первая фаза начинается непосредственно с момента взрыва и длится в течение 1...10 с. Она определяется механизмом, условно названным механизмом "магнитного диполя", который связан с разлетом плазмы продуктов взрыва в разреженный воздух в присутствии геомагнитного поля. При разлете продуктов взрыва, ионы плазмы вытесняют магнитное поле, а вместе с ними ионизированный гамма- и рентгеновским излучением компонент воздуха. Взаимодействие между ними осуществляется за счет вихревого электрического поля на масштабе, сравнимом с ларморовским радиусом ионов. На фронте плазмы образуется МГД-волна. Уровень возмущения геомагнитного поля в первой фазе тем больше, чем больше размеры плазменного облака. Следовательно, увеличение энергии взрыва должно вести к росту МГД-эффекта. При этом, как следует из экспериментальных данных, имеет место и увеличение длительности генерируемых сигналов. Усиление МГД-эффекта происходит и с ростом высоты взрыва. В этом случае разлет продуктов взрыва происходит в более разреженной атмосфере и, таким образом, геомагнитное поле вытесняется с больших объемов. Важной особенностью процесса распространения МГД-ЭМИ к поверхности земли в первой фазе, является его частичная экранировка обширными областями повышенной ионизации, которые формируют ионизирующее излучение ядерного взрыва.

Образование второй фазы МГД-ЭМИ длительностью от нескольких десятков секунд до нескольких минут обусловлено следующими физическими процессами. Ядерный взрыв возмущает (разогревает и ионизирует) обширные области атмосферы при прохождении

ударной волны и вследствие воздействия рентгеновского излучения. Разогретый воздух, расширяясь, всплывает под действием архимедовой силы. Движение ионизированного (проводящего) воздуха поперек силовых линий геомагнитного поля приводит к поляризации воздушного слоя и генерации электрического поля

$$E = v \cdot B, \quad (1.3)$$

где v – скорость движения воздушного слоя, B – индукция магнитного поля.

Область возмущенного воздуха, при движении которой образуется электрическое поле, будем называть *областью источника*. Электрическое поле в этой области формируют ионосферные токовые системы.

Конфигурация токовой системы имеет сложную трехмерную геометрию и определяется конкретными параметрами ядерного взрыва: высотой и энергией взрыва, массой зарядного устройства. Чем большее возмущение вносит взрыв, тем более обширные области атмосферы вовлекаются в движение и тем выше скорость подъема. Соответственно возрастает амплитуда генерируемого поля и длительность [1.5].

1.1.6 Амплитудно-временные параметры и формы раннего и промежуточного ЭМИ

Рассмотрим амплитудно-временные параметры сигналов ЭМИ высотного ядерного взрыва на его ранней, промежуточной и поздней стадиях, которые определены в стандартах МЭК 61000 [1.7, 1.8].

Форма раннего ЭМИ высотного ядерного взрыва

Примеры форм раннего высотного ядерного взрыва представлены на Рис. 1.5. Поскольку формы падающих сигналов изменяются очень широко, а местоположение взрыва не поддается прогнозированию, предложена обобщенная форма падающего сигнала для ЭМИ высотного ядерного взрыва, в которой отражаются короткое время нарастания вблизи эпицентра и большие напряженности ЭМИ в области максимальной амплитуды. Огибающая всех импульсов, включающая большое время спада на границе зоны прямой видимости, дана для определения наиболее жесткого случая. Более реальная форма сигнала, исходя из этих соображений, представляет собой импульс с фронтом 2,5 нс и длительностью на уровне половины амплитуды 23 нс (обозначается как 2,5/23) для исследований воздействия ЭМИ на объекты гражданского назначения.

Для всех этих случаев поведение электрического поля на раннем этапе развития ядерного взрыва в свободном пространстве определяется соотношениями:

$$E_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ E_{01} \cdot k_1 (e^{-a_1 t} \cdot e^{-b_1 t}) \text{ В/м,} & \text{при } t > 0, \end{cases}$$

$$E_{01} = 50000, \text{ В/м,}$$

$$a_1 = 4 \cdot 10^7, \text{ с}^{-1}$$

$$b_1 = 6 \cdot 10^8, \text{ с}^{-1},$$

$$k_1 = 1,3,$$

где t – текущее время, с, a_1 , b_1 – показатели экспоненты, k_1 – нормировочный коэффициент.

На Рис. 1.5а показан фронт импульса; на Рис. 1.5б – спад импульса.

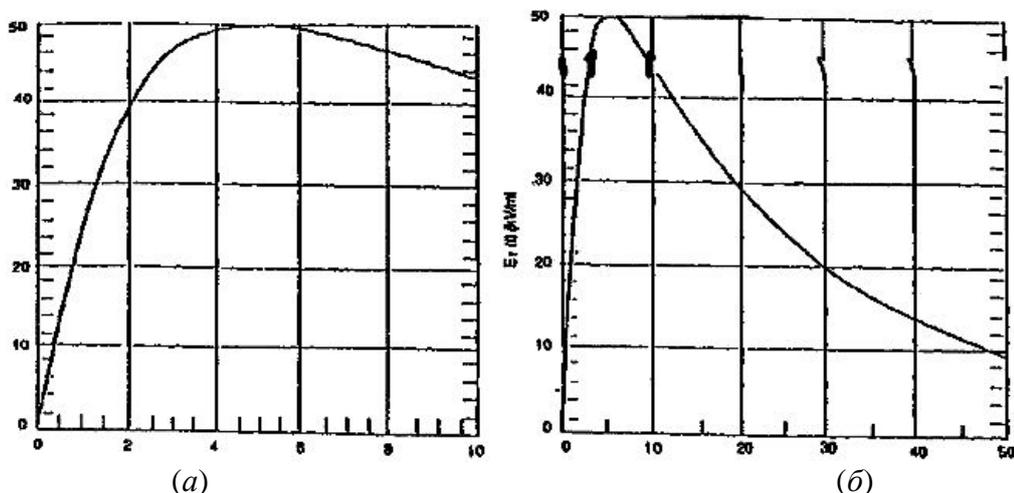


Рис. 1.5. ЭМИ высотного ядерного взрыва на ранней стадии (электрическая составляющая): (а) 0 – 10 нс (характеристика нарастания импульса), (б) 0 – 50 нс (характеристика спада импульса)

Поскольку приведенная форма сигнала не дает полной картины формы любого раннего ЭМИ высотного ядерного взрыва, обычно рассматривается форма сигнала для наихудшего случая. При этом импульс имеет максимальную амплитуду 50 кВ/м, время нарастания 2,5 нс на уровне 0,1 – 0,9 амплитуды; время до максимума – 4,8 нс, длительность импульса на полувысоте – 23 нс, поток энергии сигнала – 0,114 Дж/м².

Следует подчеркнуть, что ранний ЭМИ высотного ядерного взрыва представляет собой падающее поле, и отражения от Земли следует рассматривать отдельно. Электрическое поле поляризовано перпендикулярно направлению распространения и магнитному полю Земли. Для магнитных широт на территориях США и Европы электрическое поле поляризуется в основном горизонтально. Значение вертикальной компоненты E_z меньше 0,6 падающего электрического поля E_{in} , тогда как горизонтальная компонента E_h больше 0,8 полного падающего электрического поля E_{0in} :

$$E_z = 0,6 E_{in},$$

$$E_h \sim 0,8 E_{0in}.$$

Форма промежуточного ЭМИ ВЯВ

Промежуточный ЭМИ высотного ЯВ характеризуется амплитудой от 10 до 100 В/м на временах примерно от 0,1 мс до 0,01 с. Его поле имеет такую же, как у раннего ЭМИ, поляризацию.

Форма промежуточного электрического поля в свободном пространстве определяется соотношением

$$E_2(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ E_{02} \cdot k_2 \left(e^{-a_2 t} \cdot e^{-b_2 t} \right), \text{ В/м,} & \text{при } t > 0, \end{cases}$$

$$E_{02} = 100, \text{ В/м,}$$

$$a_2 = 1000, \text{ с}^{-1},$$

$$b_2 = 6 \cdot 10^8, \text{ с}^{-1}$$

$$k_2 = 1,$$

где t – текущее время, с, a_2 , b_2 – показатели экспоненты, k_2 – нормировочный коэффициент.

Данная форма сигнала имеет максимальную амплитуду 100 В/м, длительность импульса на полувысоте 693 мкс, поток энергии – 0,0133 Дж/м².

Поздний ЭМИ формируется благодаря МГД-эффекту и представляет собой горизонтальное электрическое поле в грунте с длительностью положительной полуволны на полувысоте 20 с и отрицательной полуволны – 130 с. Амплитуда позднего ЭМИ 40 мВ/м.

1.1.7 Область действия ЭМИ ВЯВ на поверхности Земли

Напряженность электрического поля, наблюдаемая на поверхности Земли при высотном ядерном взрыве, может значительно изменяться (по амплитуде, времени нарастания, длительности и поляризации) в пределах обширной области воздействия ЭМИ высотного ЯВ в зависимости от высоты и мощности взрыва. В северном полушарии максимальная амплитуда электрического поля наблюдается южнее эпицентра и может достигать 50 кВ/м. При взрыве на высоте 50 км, например, область, подвергающаяся воздействию ЭМИ на Земле, будет иметь радиус 800 км, а для высоты взрыва 500 км радиус прямой видимости составит около 2500 км.

Магнитная составляющая поля электромагнитного импульса составит

$$H_{01} = \frac{E_{01}}{Z_0} = \frac{50000}{120\pi} = 132,6, \text{ А/м,}$$

где E_{01} – электрическая составляющая импульса, В/м, Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства, Ом.

Описание электромагнитной обстановки

В реальной обстановке РЭА подвергается воздействию электромагнитных полей

излучения от большого числа источников. Ввиду взаимной проницаемости электромагнитных полей в любой области пространства, в один и тот же момент времени существуют поля различных источников. В реальных условиях они будут оказывать влияние на нормальное функционирование РЭА, что может привести к ухудшению качества работы или выходу ее из строя [1.3].

Существуют установившиеся в практике подходы для описания электромагнитной обстановки: электродинамический, энергетический и вероятностный.

Электродинамический подход является наиболее распространенным и широко применяемым. Он базируется на решении системы дифференциальных уравнений Максвелла и определении значений напряженности электрических E и магнитных H полей в интересующей точке или области от заданных, сосредоточенных или распределенных источников. Если существует несколько источников излучения, то на основе принципа суперпозиции электромагнитных полей в рассматриваемой области определяется суммарное значение полей излучения источников, при условии, что они не оказывают влияния друг на друга.

Энергетический подход применяют в том случае, когда необходимо знать мощность, которая может выделяться в рецепторе (чувствительном элементе РЭА) при воздействии электромагнитного поля.

Вероятностный подход широко используют при определении характеристик надежности РЭА, ее отдельных блоков и узлов, имеющих рецепторы энергии мощного электромагнитного импульса.

Приведенные подходы для описания характеристик электромагнитной обстановки применяют в зависимости от конкретных условий или требований, вытекающих из выбранных способов количественной оценки и обеспечения стойкости РЭА к воздействию электромагнитных помех [1.3, 1.24 – 1.26].

Спектр потока энергии

Многие из наиболее важных накопителей энергии ЭМИ высотного ЯВ чрезвычайно избирательны по частоте. Поэтому важно определить энергетический спектр ЭМИ в частотной области. Для нахождения сравнительного вклада составляющих частот используется преобразование Фурье временной зависимости полного электрического поля импульса:

$$\mathbf{E}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(f) \cdot e^{-j2\pi ft} dt . \quad (1.4)$$

Преобразование Фурье может быть выполнено аналитически и представлено в виде:

$$\tilde{E}_m(f) = \frac{E_{0m} \cdot K_m (b_m - a_m)}{(j 2\pi f + a_m)(j 2\pi f + b_m)} \cdot e^{-j\varphi} , \quad (1.5)$$

где φ – фазовый сдвиг ($\varphi = 0$ для E_1 и E_2 , $\varphi = 2\pi f$ для E_i и E_j).

На Рис. 1.6 показан модуль спектральной плотности электрического поля высотного ЭМИ. Каждая из составляющих показана пунктиром, а сумма всех трех импульсов (раннего, промежуточного и позднего ЭМИ), изображена сплошной линией.

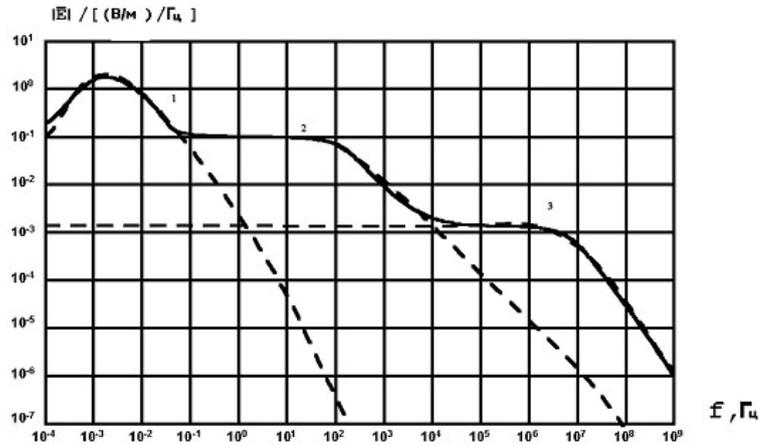


Рис. 1.6. Модуль спектральной плотности электрического поля высотного ЭМИ: 1 – для раннего ЭМИ, 2 – для промежуточного ЭМИ, 3 – для позднего ЭМИ (каждая составляющая показана пунктиром, а обобщенный импульс – сплошной линией)

Энергетический спектр $S(f)$ показывает значение плотности энергии (энергосодержание) как функцию частоты (например, для дальней зоны $f > 10^3$ Гц):

$$S(f) = \frac{2|\mathbf{E}(f)|^2}{120\pi}, \text{ Дж/м}^2/\text{Гц}. \quad (1.6)$$

Поток W_T энергии раннего ЭМИ можно найти, интегрируя (1.6) в частотной области:

$$W_T = \int_{10^3}^{+\infty} S(f) \cdot df, \quad W_f = \int_{10^3}^{f_1} S(f) \cdot df. \quad (1.7)$$

На Рис. 1.7 показан нормированный поток энергии ЭМИ высотного ЯВ как функция частоты.



Рис. 1.7. Частотная зависимость нормализованного совокупного потока энергии от частоты

Например, при $f_1 = 10^6$ Гц поток энергии на частотах ниже 10^6 Гц составляет 12 %, ниже 10^8 Гц – около 100 %. Это означает, что 88 % потока энергии приходится на диапазон частот от 10^6 до 10^8 Гц.

Этот пример свидетельствует о том, что основная часть импульса ЭМИ высотного ЯВ (с точки зрения потока энергии) приходится на интервал частот от 0,1 МГц до 100 МГц.

Допуская значимость двух остальных частей импульса и сравнивая на Рис. 1.6 сплошную линию с горизонтальной пунктирной, можно сказать, что в низкочастотном диапазоне модуль спектральной плотности обобщенного ЭМИ высотного ЯВ почти на два порядка (40 дБ) выше, чем у раннего ЭМИ. Поток W_T энергии для раннего ЭМИ равен 0,114 Дж/м, тогда как для суммарной кривой (сплошная линия на Рис. 1.6) поток энергии составляет 0,127 Дж/м, что несколько выше. Поток энергии позднего-МГД-ЭМИ в данном контексте пренебрежимо мал.

Однако следует заметить, что энергия, которая отбирается у электромагнитного поля "антенной" и затем проводится к поражаемому объекту, зависит не только от полного падающего потока энергии. Напряжения и токи, наводимые в электронном оборудовании системы, зависят также и от механизмов затекания, топологии системы, согласования полных сопротивлений, а в энергетических сетях – от токов, протекающих после пробоя диэлектрика и других факторов.

Значимость раннего, промежуточного и позднего ЭМИ высотного ЯВ

Эффекты промежуточного и позднего ЭМИ в открытой литературе часто

игнорируются, поскольку рассматриваются только их малые амплитуды. Считают, что значениями амплитуд в 100 В/м (для средних времен) и 40 мВ/м (на поздних временах) можно пренебречь по сравнению с 50000 В/м раннего ЭМИ.

Это положение иногда справедливо, особенно, если поражаемая система (подсистема, оборудование) не слишком велика по своим физическим размерам (малые площади взаимодействия), например, мобильная боевая техника в виде боевой машины, что ограничивает взаимодействие ЭМИ только высокими частотами. Однако механизм затекания энергии от источника (электромагнитного поля) на поражаемый объект избирателен по частоте.

Не следует делать обобщающие выводы, исходя только из рассмотрения спектра ЭМИ высотного ЯВ (Рис. 1.6), без учета механизма взаимодействия (затекания). В случае, если поражаемая система весьма протяженная (как, например, электроэнергетические системы или линии дальней связи), или, если небольшая система подключена к такой линии, обязательно следует учитывать промежуточный и поздний ЭМИ высотного ЯВ.

Отражение и преломление ЭМИ

При падении ЭМИ высотного ЯВ на Землю часть энергии импульса проходит через границу раздела воздух-грунт, а остальная часть отражается (Рис. 1.8). Практически во всех случаях падающая волна изменяется под влиянием других структур, находящихся вблизи потенциального поражаемого объекта. Например, поле вблизи энергетических линий и подземных кабелей связи изменяется под влиянием Земли. Поэтому поле, воздействующее на кабель, не является полем падающей волны, а представляет собой результирующее поле.

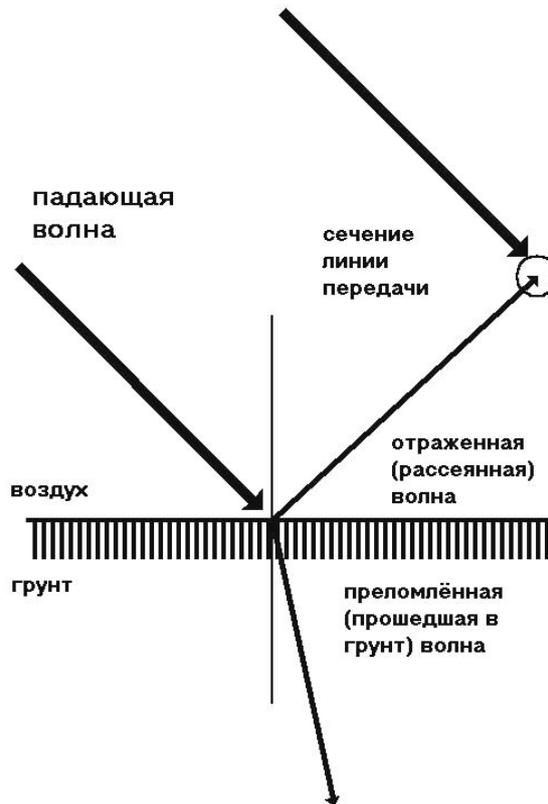
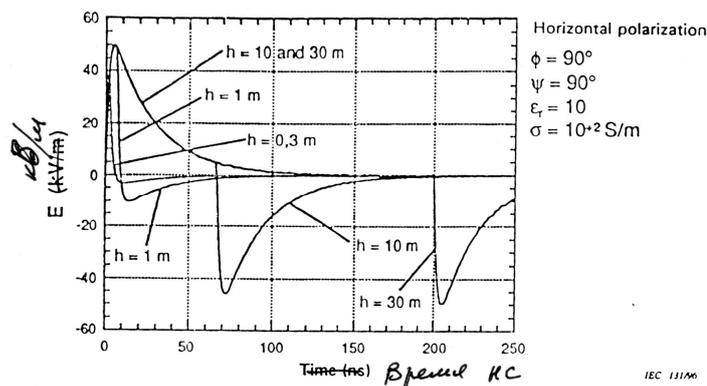


Рис. 1.8. Падающая, преломлённая и отражённая волны

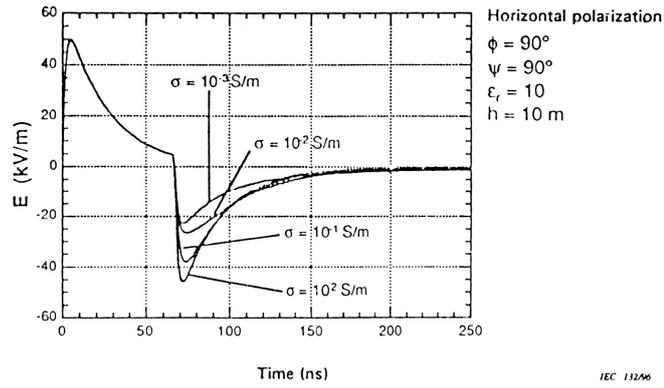
Поднятый над Землей накопитель энергии как, например, воздушная линия электропередачи или антенна радиомачты, получает энергию и от прямого, и от отраженного импульсов.

Для подземного кабеля результирующее поле является частью падающего поля, прошедшей в грунт через границу раздела воздух-грунт и частично поглощенной в грунте.

По мере распространения в грунте составляющие электромагнитного поля сохраняют общий вид, однако за счет быстрого поглощения высоких частот в спектре сигнала существенно увеличивается длительность фронта и всего импульса, уменьшается его амплитуда. На Рис. 1.9 – Рис. 1.11 [1.7] приведены результаты расчета ЭМИ при вертикальной и горизонтальной поляризациях падающего сигнала.



a)



б)

Рис. 1.9. Расчетные значения горизонтального электрического поля при горизонтальной поляризации как суммы падающих и отраженных полей для ЭМИ высотного ЯВ (ранний ЭМИ): а – для различных высот h над поверхностью с хорошей проводимостью, б – для различных проводимостей σ_{gnd} почвы

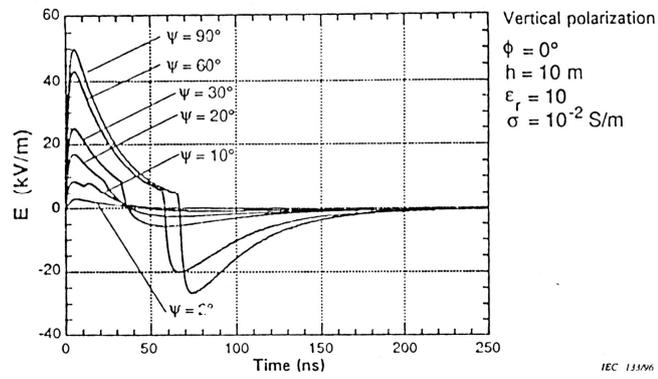
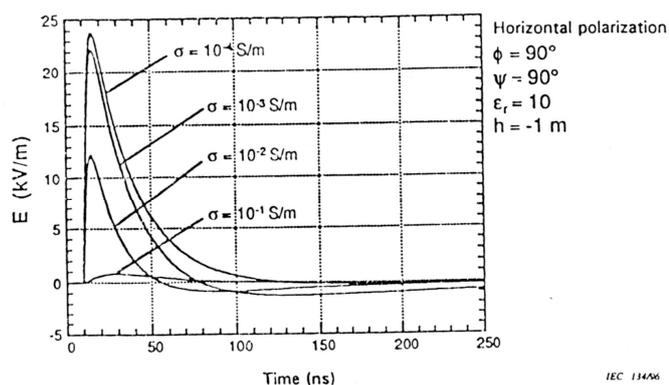


Рис. 1.10. Рассчитанное горизонтальное электрическое поле при вертикальной поляризации как суммы падающих и отраженных полей для ЭМИ высотного ЯВ (ранний ЭМИ) для различных углов подъема



a)

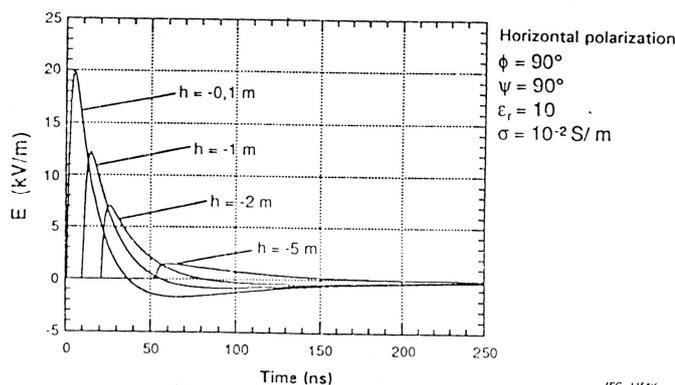


Рис. 1.11. Расчетные значения прошедшего горизонтального электрического поля для ЭМИ высотного ЯВ (ранний ЭМИ): а – при различной проводимости почвы, б – при различном заглублении в почву

1.2 Источники мощных электромагнитных помех большой энергии естественного и искусственного происхождения.

1.2.1 Молния

Классификация молний

Молнии – это наиболее распространенный источник мощных электромагнитных помех естественного происхождения. По приближенным подсчетам в земную поверхность ежесекундно ударяют около ста молний. На окружающие предметы, электротехнические сооружения, средства связи, РЭС молнии оказывают неблагоприятные воздействия: электростатическое, электромагнитное, динамическое, термическое. Удары молнии нередко приводят к гибели людей и наносят большой материальный ущерб [1.12 –1.15].

Молния представляет собой разновидность газового разряда при очень большой длине искры. Общая длина канала молнии достигает нескольких километров. Источником молнии является грозовое облако, несущее в себе скопление объемных положительных и отрицательных зарядов. Образование таких объемных зарядов различной полярности в облаке (поляризация облака) связано с конденсацией вследствие охлаждения водяных паров восходящих потоков теплого воздуха на положительных и отрицательных ионах (центрах конденсации) и разделения заряженных капелек влаги в облаке под действием интенсивных восходящих воздушных потоков.

В природе различают три основных типа грозových разрядов: *линейная молния* – имеет вид узкой полосы между облаком и землей, между облаками или между отдельными скоплениями объемных зарядов внутри облака; *шаровая молния* — ярко светящийся, подвижный, выпуклый, относительно устойчивый сгусток плазмы, возникающий и исчезающий по мало изученным в настоящее время причинам; *тихие разряды* — корона, возникающая в местах резкой неоднородности напряженности электрического поля на выступающих заземленных предметах в предгрозовой период и во время грозы.

Линейная молния (в дальнейшем "молния") встречается в природе наиболее часто и является, по сравнению с другими видами грозových разрядов, самым распространенным источником мощных ЭМП.

Грозовой разряд развивается по различным путям. Внутриоблачные разряды чаще всего бывают во время гроз, возникающих высоко над землей. В таких условиях молнии легче развиваться от нижней части заряженного облака к верхней или наоборот, чем пройти долгий путь от основания облака, т. е. ближайшей к земле кромке, до земли. Внутриоблачные разряды нередко наблюдаются в засушливых районах, где облака выше над поверхностью земли, чем в районах с влажным климатом. Для средних широт, где облака располагаются на высоте около 1...3 км, число внутриоблачных разрядов и разрядов между облаками и землей почти одинаково.

Поляризация облака в процессе разделения зарядов происходит не одинаково. В 75...85 % всех случаев основание облака несет отрицательный заряд и в процессе разряда именно заряд этой полярности передается земле. При этом амплитудное значение тока молнии при отрицательной ее полярности в среднем в 1,5...2 раза ниже, чем при положительной.

Механизм образования линейной молнии связан с постепенным накоплением разнополярных электрических зарядов на верхней и нижней частях облака и образованием вокруг него электрического поля возрастающей напряженности. Когда градиент потенциала в какой-либо точке облака достигает критического для воздуха значения (при нормальном атмосферном давлении около $3 \cdot 10^6$ В/м), в этом месте возникает молния, которая начинается лидерной стадией и завершается обратным (главным) разрядом. Главная стадия грозowego разряда и является источником мощных ЭМП. Ввиду того, что в облаке образуется несколько изолированных друг от друга скоплений зарядов, молния обычно бывает многократной, т. е. состоит из нескольких единичных разрядов, развивающихся по одному и тому же пути. Средняя продолжительность главного разряда 20...50 мкс; число повторных разрядов может колебаться от 2 до 10 и более; интервал

времени между повторными разрядами 0,001...0,5 с.

На Рис. 1.12 представлены отдельные стадии разряда молнии и соответствующее этим стадиям изменение во времени тока молнии (Рис. 1.13).

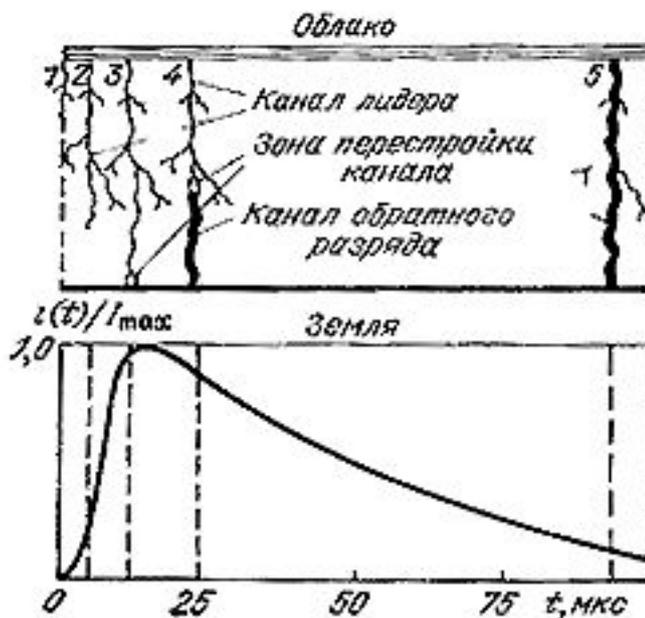


Рис. 1.12. Отдельные стадии развития обратного разряда и соответствующие им изменение во времени тока молнии: 1 – начало лидерной стадии; 2 – последняя стадия лидерного разряда; 3 – стадия интенсивной ионизации вблизи поверхности земли; 4 – промежуточная стадия обратного разряда; 5 – заключительная стадия обратного разряда

Характеристики молнии

Как показывают измерения, разрядный ток молнии представляет собой импульс с быстрым нарастанием тока от нуля до максимума (фронт волны) и сравнительно медленным спадом (хвост волны). Поскольку на осциллограммах начало волны и момент максимума точно определить трудно, для удобства обработки осциллограмм действительный фронт импульса заменяется эквивалентным косоугольным (Рис. 1.13). Для этого на линии фронта импульса отмечаются точки с координатами $0,1I_{max}$ и $0,9I_{max}$ и через них проводится прямая линия. Ее пересечение с нулевой линией (точка 0_1 – условное начало импульса) и горизонтальной прямой, проведенной через точку, определяющую уровень амплитудного значения тока молнии, и выражает длительность фронта импульса τ_f . Длительность импульса τ_n — это время от условного начала до момента, когда ток молнии на кривой спада становится равным половине своей амплитуды. Импульс тока молнии характеризуется отношением τ_f/τ_n .

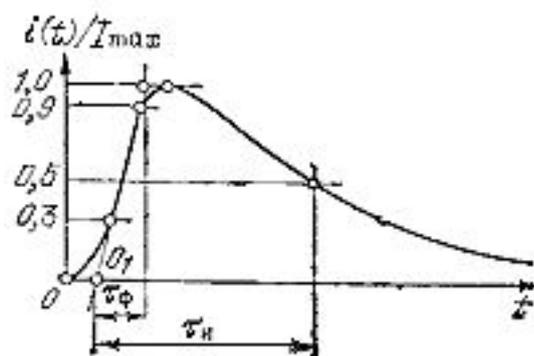


Рис. 1.13. К определению амплитудно-временных характеристик импульса тока молнии

Амплитудно-временные характеристики импульса тока молнии изменяются в широких пределах и носят вероятностный характер. Так, ток молнии изменяется от единиц до сотен килоампер. Установлено, что молнии с большой амплитудой тока возникают очень редко. Так, ток молнии 180 кА возникает в случаях, число которых равно 0,1 % от общего числа наблюдавшихся молниевых разрядов; а число случаев ударов молнии с током 70 кА составляет 3 %.

Большое влияние на максимальную амплитуду тока молнии оказывает удельное сопротивление грунта ρ_{gnd} . В районах с плохо проводящими породами, где это сопротивление равно 600...1000 Ом·м, расчетные для грозозащиты токи будут иметь амплитуду около 15 кА. В то же время в районах с удельным сопротивлением грунта 100...200 Ом·м значение амплитуды тока молнии при прочих равных условиях может быть на порядок выше, чем для районов с плохо проводящими породами.

По данным многочисленных наблюдений при ударах молнии в землю длительность фронтов волн колеблется в пределах от 1 до 15 мкс, а длительность импульса достигает 10...100 мкс.

Грозовой разряд облака характеризуется следующими усредненными значениями параметров:

- | | |
|---|-----------------------|
| • заряд грозового облака, К | 10...100 |
| • потенциал облака, В | $10^8...10^9$ |
| • ток разряда облака, А | $10^4...2 \cdot 10^5$ |
| • время разряда, мкс | 5...100 |
| • средняя длина молнии, м | $10^3...7 \cdot 10^3$ |
| • диаметр канала молнии, м | 0,03...0,6 |
| • интервал времени между отдельными повторными разрядами, с | 0,001...0,5 |
| • число разрядов | 1...30 |

Важным фактором грозовой деятельности является ее интенсивность, которая для различных районов неодинакова и, как правило, минимальна на севере и увеличивается по

мере приближения к южным районам. В отдельных местах Европейской части России число грозových дней в году достигает 30..50, а на Кавказе — 40...50. Число разрядов, приходящихся на 1 км² в год, точно не определено, для России оно составляет ~ 0,1...0,09.

При осуществлении мер защиты и определения электромагнитной обстановки в той или иной области в качестве расчетных могут быть приняты следующие значения основных параметров:

• амплитуда тока молнии, А	30000
• высота облака над землей, м	2000
• длина канала молнии, м	4500
• число повторных разрядов в течение одного видимого удара молнии	3
• длительность фронта импульса, мкс	2
• длительность разряда молний, мкс	50
• общая продолжительность молнии, с	0,5
• число разрядов в год	10...40

Наибольшие значения амплитуд в спектре излучения молнии соответствуют частотам 300...20000 Гц.

Энергия канала разряда, составляющая примерно 10⁶ Дж, вызывает акустическое (гром), термическое, световое, электромагнитное воздействия на окружающую среду. При этом могут происходить специфические повреждения объектов (разрушения, пожары) при непосредственных ударах в объект. Несмотря на то число таких повреждений за счет внедрения соответствующих средств грозозащиты непрерывно снижается, вред, наносимый косвенным воздействием молний на электронные средства в промышленности, сфере обслуживания и других, резко возрастает.

С точки зрения интенсивности воздействия молнии различают *непосредственные* или близкие удары и *удаленные* разряды. При непосредственных ударах молния ударяет в молниеприемники защищенных зданий, устройств, соединенных, например кабелями низкого напряжения, линиями связи и управления.

На Рис. 1.14 и Таблица 1.1. дают представление о токах молнии и об их специфическом воздействии. При одной молнии могут наблюдаться до 10 импульсов тока, следующих друг за другом с интервалом от 10 до 100 мс. С точки зрения электромагнитной совместимости интерес представляет то обстоятельство, что при ударе молнии в заземляющее устройство его потенциал относительно удаленных точек земли может повыситься до миллиона вольт. Поэтому в контурах, образованных сигнальными кабелями и проводами, связывающими различные объекты, в том числе и в линиях электроснабжения, передачи данных, могут, в зависимости от размеров контуров и расстояний до места удара, индуцироваться напряжения от нескольких десятков вольт до

МНОГИХ СОТЕН КИЛОВОЛЬТ.

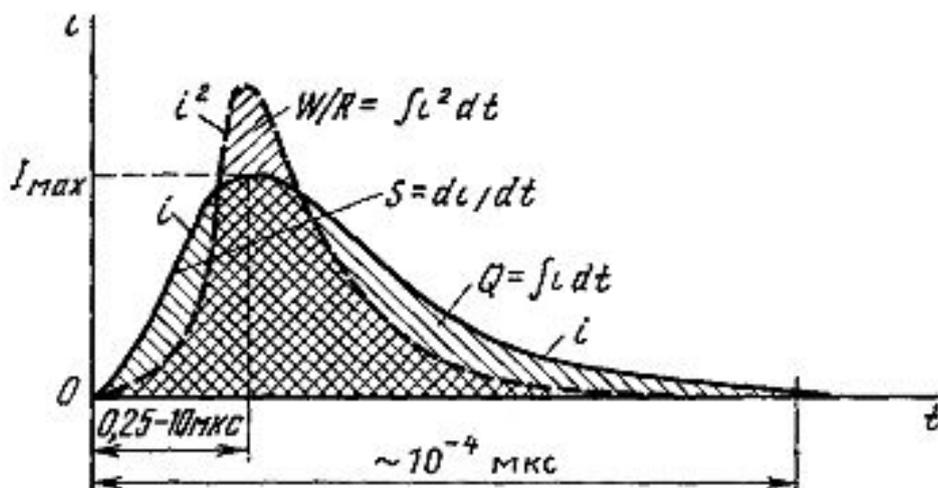


Рис. 1.14. Форма импульса тока молнии при разряде с облака на землю

При удаленных ударах молнии, например при разрядах на линии среднего напряжения или при междуоблачных разрядах, индуцированные перед разрядом заряды на линиях электропередачи освобождаются. В этом случае вдоль линии с большой скоростью распространяется волна перенапряжения. При достижении подстанции, которая питает сеть низкого напряжения, перенапряжения ограничиваются либо электрической прочностью изоляции, либо остающимся напряжением защитных разрядников до нескольких десятков киловольт. Если у объекта отсутствуют защитные устройства, ограничивающие перенапряжения, то могут происходить неконтролируемые перекрытия и пробой в слабых местах изоляции или в самом простом варианте нарушения функционирования электронного оборудования из-за проникновения помехи через систему его питания.

Любая молния и любой ток в проводах, обусловленный молнией, вызывают переходные электромагнитные поля, которые могут вызвать в электрических контурах напряжения с мешающими или разрушающими последствиями. Оценка напряженностей этих полей на расстояниях 10 и 100 м от канала молнии приведена в Таблица 1.2.

В связи с опасностью грозовых разрядов реализуется концепция двухступенчатой защиты посредством так называемых внешних и внутренних мероприятий по молниезащите. Внешняя молниезащита охватывает все мероприятия, направленные на то, чтобы организовать отвод тока молнии так, чтобы внутри здания не возникали высокие разности потенциалов и сильные электромагнитные поля помех. Внутренняя молниезащита должна снизить до приемлемых уровней остающиеся воздействия на объекты внутри помещения.

Таблица 1.1. Характеристики воздействия молнии на объекты

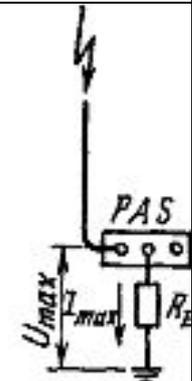
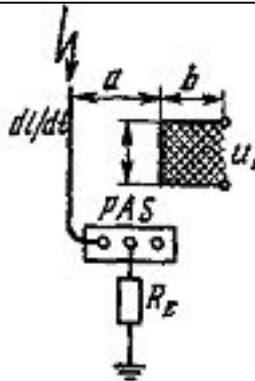
Параметр	Максимальный ток I_{\max}	Крутизна тока $S = di/dt$	Заряд $Q = \int i dt$	Интеграл $W/R = \int i^2 dt$
Значение	2 – 200 кА	2 – 200 кА/мкс	150 – 300 А·с	2,5 – 10 МДж/Ом
Воздействие в точке удара	Повышение потенциала относительно удаленной земли	Индукирование напряжения в петлях	Плавление металла в точках удара	Нагрев проводников, по которым протекает ток молнии
Эскиз молниеотвода				
Пример	$I_{\max} = 200$ кА; $R_E = 5$ Ом; $U_{\max} = 1$ МВ	$S = 200$ кА/мкс $a = 10$ м $b = 0,1$ (10) м $u_i = 40$ В (216 кВ)	При $Q = 300$ Кл плавятся алюминиевые стенки толщиной до 5 мм	При $W/R = 10$ МДж/Ом плавятся медные провода сечением 10 мм ² и стальные сечением 25 мм ²

Таблица 1.2. Параметры электромагнитных полей молнии

Параметр	Молния на расстоянии от места удара, м	
	10	100
Напряженность электрического поля, E , кВ/м	Несколько сотен	40
Напряженность магнитного поля, H , А/м	Несколько сотен	160
Фронт импульса, τ_f , нс	Десятки – тысячи	
Частотный спектр	1 кГц – 5 МГц	
Область действия	Локальная, несколько км	

Параметры токов прямого удара молнии и его эффект

Токи молниевых разрядов образуются в результате природного явления, за исключением случаев возникновения молний в районе источника наземного ядерного взрыва. По данным работы [1.2], молниям, возникающим в результате ядерного взрыва, соответствуют относительно небольшие токи амплитудой порядка 10 кА и зарядом не более 15 Кл. Воспроизведение таких токов не является сложной технической задачей.

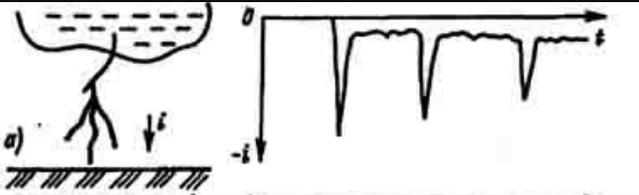
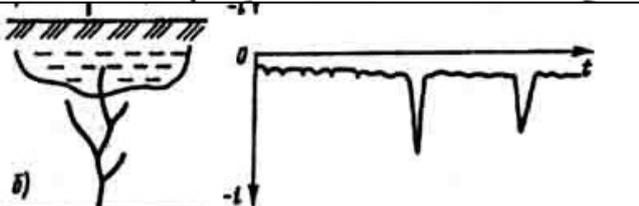
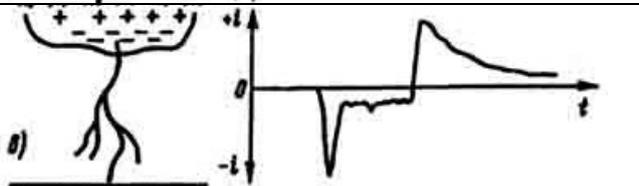
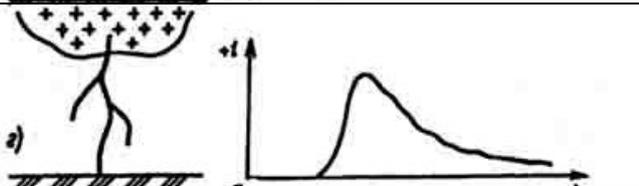
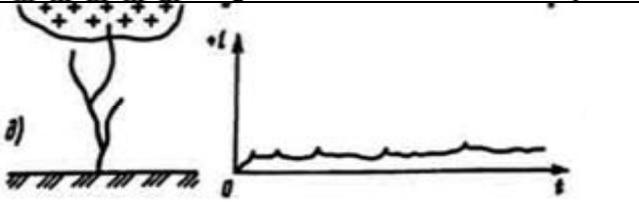
Наибольшую опасность для технических средств представляют токи прямого удара молнии с амплитудами до сотен килоампер, микросекундным фронтом и миллисекундной длительностью.

Амплитудно-временные зависимости импульсов тока молнии характеризуются сложной формой и содержат, как правило, несколько всплесков.

По классификации Бергера молнии подразделяются на положительные и отрицательные, нисходящие и восходящие [1.15]. Большинство молний (примерно 80%) происходит с отрицательно заряженных облаков.

Для отрицательных молний характерны следующие величины амплитуд и длительностей. Медленно нарастающая часть тока (ток лидера) длительностью 10-20 мс характеризуется небольшой амплитудой (сотни ампер). Первый импульс (ток главного канала) с длительностью спада до 100 мкс характеризуется фронтами 5...20 мкс с максимальными амплитудами до 100 кА. Составляющая между импульсами (ток после свечения) длительностью 30...50 мс характеризуется небольшой средней амплитудой в десятки-сотни ампер. Последующие импульсы имеют меньшую амплитуду, более короткие фронты и длительности. Общая длительность импульса тока может достигать от десятков миллисекунд до 1 секунды. Типовые измеренные формы токов реальных молний представлены в Таблица 1.3.

Таблица 1.3. Типовые измеренные формы токов реальных молний

Тип разряда	Вид разряда
а) нисходящая молния с отрицательно заряженного облака;	
б) восходящая отрицательная молния	
в) переменной полярности молния	
г) нисходящая молния с положительно заряженного облака;	
д) восходящая положительная молния.	

Для положительных молний (Таблица 1.3,г) начальная стадия характеризуется лидером тока амплитудой до 1 кА и длительностью, достигающей нескольких десятков миллисекунд. По сравнению с отрицательной молнией для импульсной составляющей характерны более высокие амплитуды тока с максимальными значениями в сотни килоампер при длительностях порядка сотен микросекунд. Заключительная стадия характеризуется током амплитудой до 1 кА и длительностью, достигающей сотен миллисекунд.

Однако для оценки поражающего действия тока прямого удара молнии пользоваться стандартными параметрами амплитуды, фронта и длительности неудобно, поскольку однозначной связи между указанными параметрами в настоящее время не установлено. Наиболее современным методом оценки поражающего действия тока прямого удара молнии является метод, основанный на оценке параметров, определяющих эффекты электромагнитного, термического и электродинамического воздействия [1.16, 1.26]:

- максимальная амплитуда I_{\max} ;
- скорость нарастания (крутизна) тока $S = di/dt$;
- переносимый током заряд $Q = \int i(t) dt$;
- интеграл квадрата тока (интеграл действия) $W/R = \int i^2(t) dt$.

От максимального значения тока I_{\max} зависит наибольшее падение напряжения U_{\max} на участках разрядного контура, содержащих активное сопротивление R :

$$U_{\max} = RI_{\max}. \quad (1.8)$$

Максимальные значения электродинамических сил, действующих на проводники с током молнии (сжимающие силы, действующие на трубчатые проводники, или отталкивавшие силы, действующие на участки разрядного контура при отклонении расположения проводников от прямолинейного, например при изгибах), прямо пропорциональны квадрату максимального значения тока I_{\max}^2 .

Крутизной S определяются падение напряжения U_L на участках разрядного контура, характеризующихся индуктивностью L :

$$U_L = L \cdot di/dt, \quad (1.9)$$

а также индуцированные напряжения U_M в различных контурах, связанных с каналом разряда взаимной индуктивностью M :

$$U_M = M \cdot di/dt. \quad (1.10)$$

Заряд Q используется для оценок термического действия канала молнии на поражаемый объект, так как ему прямо пропорциональна энергия, выделяющаяся в приэлектродной зоне. Эта пропорциональность объясняется тем, что приэлектродное падение напряжения U_e в широких диапазонах значений тока и времени остается

практически постоянным. Следовательно, значение выделившейся энергии можно найти из выражения:

$$W = \int U_e i dt = U_e \int i dt = U_e Q \equiv Q. \quad (1.11)$$

Параметр W/R характеризует тепловое действие тока на участок цепи с активным сопротивлением R . От него зависит энергия W , выделившаяся в линейном сопротивлении:

$$W = R \int i^2(t) dt. \quad (1.12)$$

Следует отметить, что при грозовом разряде эта энергия практически полностью идет на нагрев участка цепи, определяющего сопротивление R , так как тепловые процессы чрезвычайно инерционны, и обмен энергией с окружающей средой за время разряда незначителен.

При необходимости можно учесть также нелинейность сопротивления R , вызванную температурной зависимостью удельного сопротивления материала или фазовыми переходами. В этом случае, зная W/R , не сложно определить температуру материала после протекания по нему импульса тока.

Естественно, условия возникновения грозового разряда, параметры тока и изменение его во времени определяются в каждом конкретном случае сложившейся ситуацией, положением и размерами грозового облака, его структурой, условиями электризации, плотностью воздуха, распределением напряженности электрического поля внутри облака и на участках, где формируется канал разряда (между облаками и землей, между облаками, с облака на землю). Так как ситуация непрерывно изменяется, то положение зоны, где начинается разряд, является случайным, а все электрические характеристики, и в первую очередь, параметры тока молнии, подвержены статистическим разбросам.

Статистические данные о параметрах токов молнии

Наиболее полные сведения об основных параметрах токов молнии представлены в стандарте МЭК-62305-1, статистические данные которых представлены на Рис. 1.15.

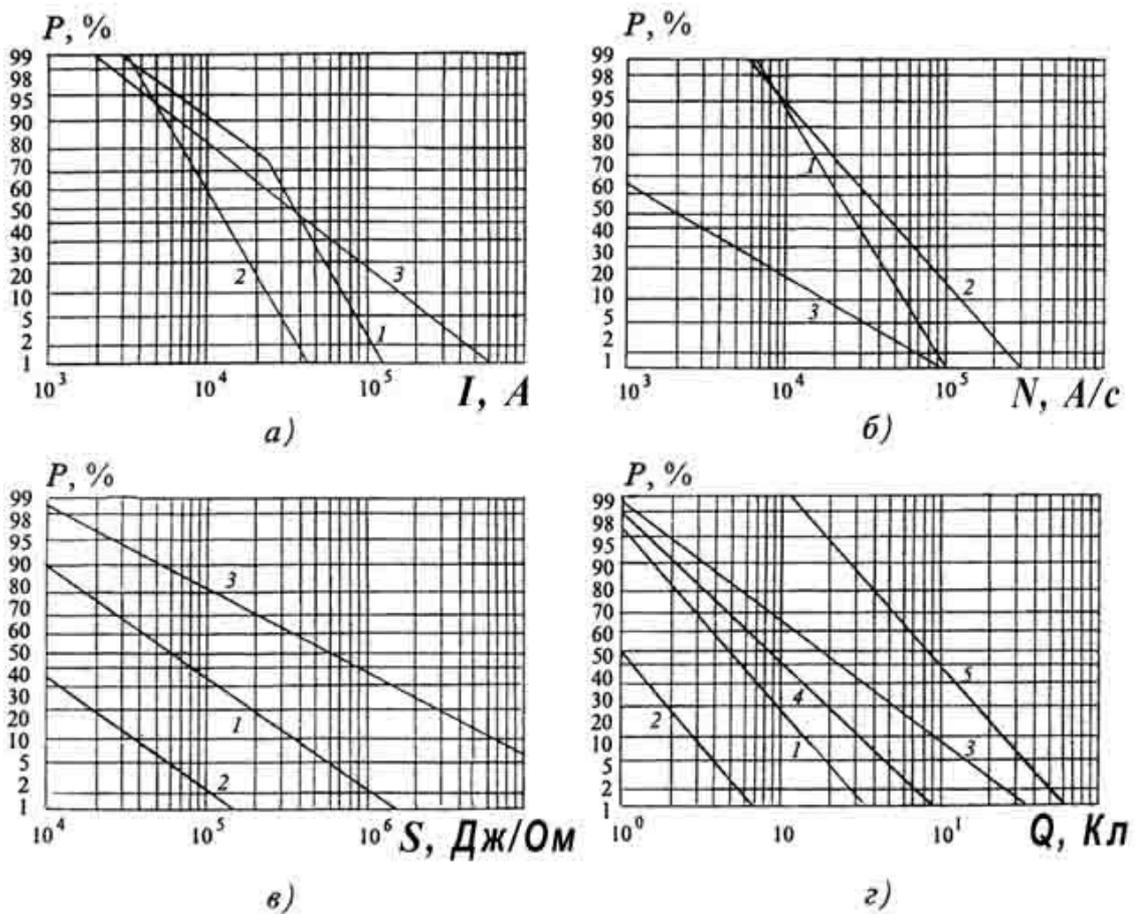


Рис. 1.15. Вероятностные характеристики параметров токов молнии: а) - для максимального тока; б) - для крутизны; в) - для удельной энергии; г) - для заряда; 1- 1-й импульс отрицательной молнии; 2- 2-й импульс отрицательной молнии; 3- импульс положительной молнии; 4- суммарный заряд, переносимый током отрицательной молнии; 5- суммарный заряд, переносимый током положительной молнии; $p, \%$ – вероятность того, что значение параметра не менее приведенного.

Как видно из графика на Рис. 1.15,а максимальные значения амплитуд характерны для положительной молнии. С вероятностью $p = 1 \%$ общего числа измеренных положительных молний $I_{\max} \approx 600$ кА. Соответственно, для отрицательных молний $I_{\max} \approx 100$ кА.

Максимальные значения крутизны (Рис. 1.15,б) при $p = 1 \%$ характерны для 2-го импульса отрицательной молнии и составляют $S \approx 300$ кА/мкс. Для 1-го импульса $S \approx 100$ кА/мкс. Для положительной молнии при $S \approx 90$ кА/мкс ($p = 1 \%$).

Следует подробнее отметить особенности характеристики крутизны тока. При непосредственных измерениях крутизны с помощью осциллографов было установлено, что этот параметр тока молнии очень сильно и нерегулярно изменяется во времени. Наибольшая крутизна тока наблюдается в интервале времени, гораздо меньшем длительности фронта. Отчетливое представление об этом можно получить из осциллограмм, приведенных на Рис. 1.16.

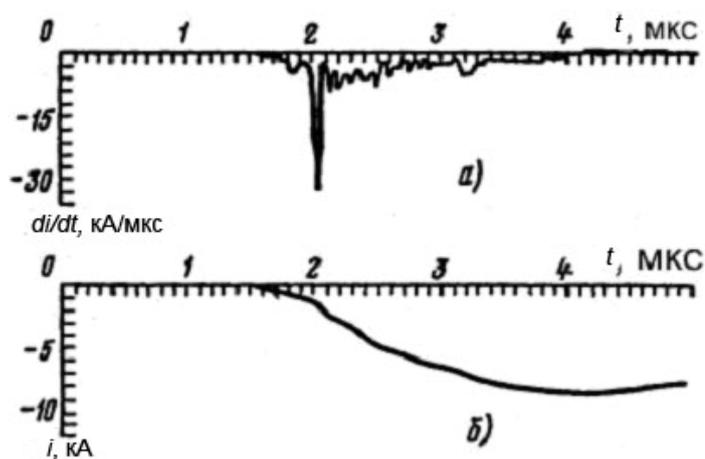


Рис. 1.16. Осциллограммы di/dt (а) и $i(t)$ (б) для токов молнии

Как видно из осциллограмм, максимальное значение крутизны характерно для участка времени не более 100 нс (Рис. 1.16,а) при длительности фронта тока несколько микросекунд (Рис. 1.16,б). Существующие нормированные параметрические модели тока молнии не учитывают эту особенность.

Статистические данные для длительностей фронта представлены на Рис. 1.17.

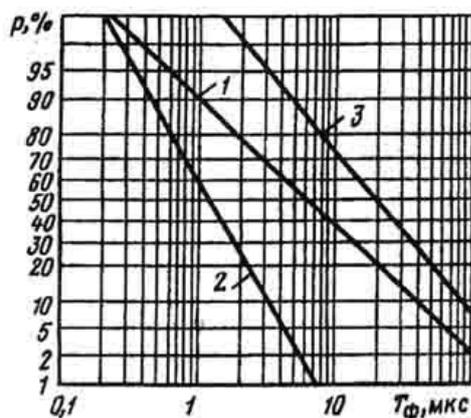


Рис. 1.17. Статистические данные по длительности фронта импульса молнии: 1 – первые импульсы отрицательных молний; 2 – вторые импульсы отрицательных молний; 3 - импульсы положительных молний

Из данных Рис. 1.17 видно, что максимальные значения фронта свыше 100 мкс характерны для положительной и 1-го импульса отрицательной молний при $p = 1\%$, а для второго импульса отрицательной молнии – около 8 мкс. Минимальные значения при $p = 99\%$: для положительной – около 2 мкс, для 1-го и 2-го импульсов отрицательной молнии – около 0,2 мкс. Следует отметить, что большим токам молнии будут соответствовать более длинные фронты. Так, по данным многочисленных измерений амплитуде 60 кА будет соответствовать длительность фронта не менее 2 мкс, амплитуде 20 кА – не менее 1 мкс. Эта особенность также не учитывается в существующих нормированных моделях молнии.

Так как условия накопления отрицательных и положительных зарядов в облаке не одинаковы и по-иному формируются каналы разряда, то и заряды, переносимые токами с

облака на землю, неодинаковы при разных видах молнии. Так, заряд положительной молнии намного больше отрицательной. В обоих случаях основная доля заряда переносится в интервалах между импульсами или после импульса тока главного разряда положительной молнии. Поэтому ответственным за переносимый заряд можно считать ток постоянной составляющей, вклад которой составляет не менее 70 %. Статистические данные о зарядах Q , переносимых на землю при положительных и отрицательных молниях, приведены на Рис. 1.15,з.

Энергия в основном определяется импульсными составляющими тока. Вклад постоянной составляющей тока молнии в W/R незначителен. Как и заряд Q , интеграл действия W/R при положительных молниях выше, чем при отрицательных (см. Рис. 1.15,в).

Многими авторами предпринимались попытки обобщить параметры токов молнии с тем, чтобы дать единые зависимости для определения вероятностей основных параметров тока (максимального значения тока, крутизны, удельной энергии и переносимого током заряда). Основой для обобщения послужили данные К. Бергера. Обобщенные статистические данные по основным параметрам молнии приведены на Рис. 1.18.

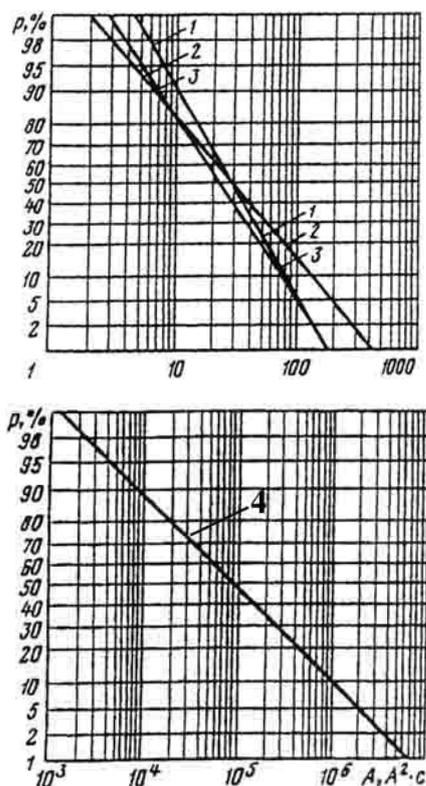


Рис. 1.18. Обобщенные данные по параметрам молнии: 1 – максимальный ток; 2 – заряд; 3 – крутизна тока; 4 – удельная энергия

В некоторых случаях, например, при определении термического воздействия искрового канала молнии на объекты, необходимо иметь сведения не только о заряде, но и о значении постоянной составляющей тока молнии. Данные о вероятности значений амплитуды I_c и длительностей постоянной составляющей тока молнии приведены на Рис.

1.19.

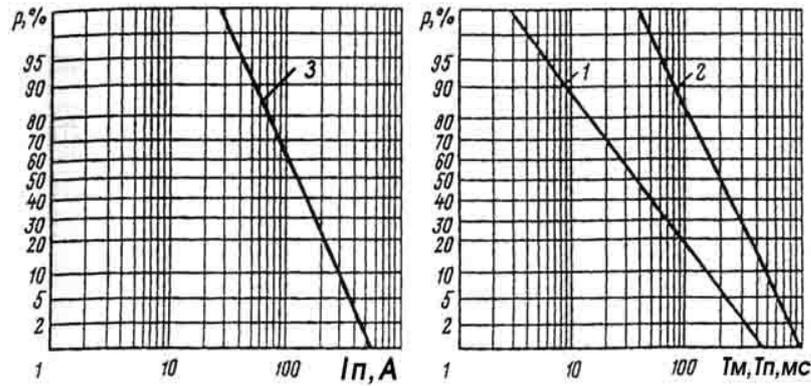


Рис. 1.19. Статистические данные об амплитудах и длительностях постоянной составляющей: 1 – длительность T_p пауз между импульсами тока отрицательных молний; 2 – общая длительность T_T тока молнии; 3 – амплитуда I_c постоянной составляющей тока

В ряде случаев приведенных обобщенных параметров токов молнии может оказаться недостаточно для решения проблем молниезащиты. При рассмотрении молний в других климатических зонах и при других объектах, соотношение различных типов молний может измениться. Однако именно обобщение параметров токов молнии положено в основу при разработке нормированных моделей испытательных форм.

Требования к импульсам тока задаются не в виде параметров характеризующих молнию, а в виде «жесткой» привязки к параметрам стандартного аperiodического импульса: амплитуды I_{\max} , длительности фронта t_r и длительности импульса t_p . Такие параметры можно пересчитать к параметрам молнии с помощью следующих соотношений [1.31]:

определение крутизны тока

$$S = 0,8 I_{\max} / t_r, \quad (1.13)$$

определение энергии

$$W / R = I_{\max}^2 \cdot t_p / 1,4, \quad (1.14)$$

определение переносимого током заряда

$$Q = I_{\max}^2 \cdot t_p / 0,7. \quad (1.15)$$

Наиболее приближенными к характеристикам молнии являются параметры, заданные в американском стандарте MIL-STD-1757.

Достигнуть обобщения всех параметров тока, как для отрицательной, так и для положительной молнии ни в одном стандарте не удалось. Основные параметры многокомпонентных моделей тока расходятся по отношению к измеренным параметрам положительной и отрицательной реальных молний, как в большую, так и в меньшую сторону. Для однокомпонентных моделей расхождение проявляется еще сильнее.

В Таблица 1.4 представлены значения основных параметров воздействия

отрицательной и положительной молнии, полученные по результатам многолетних измерений с вероятностью превышения максимального значения 5 %. (для вероятности 1 % значения указаны в скобках) для каждого типа молний, а также параметры многокомпонентных и однокомпонентных моделей молнии, заданные в военном стандарте MIL-STD-1757 (США).

Таблица 1.4. Максимальные значения параметров тока молнии

Источники информации	Амплитуда, кА			Крутизна, кА/мкс			Интеграл действия, А ² ·с			Заряд, Кл	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1,2	3
(по Бергеру, Стекольникову и др.)	80 (12 0)	30 (42)	220 (600)	70 (100)	120* 160** (300)	18 (90)	6·10 ⁵ (1,3·10 ⁶)	6·10 ⁴ (1,3·10 ⁵)	1·10 ⁷ (около 1·10 ⁸)	50 (90)	350 600
Требования MIL-STD-1757 (США)	200	100	-	-	140	-	2·10 ⁶	2,5·10 ⁵	-	210	

Примечания:

1 – первый пик отрицательной (многокомпонентной) молнии;

2 – второй пик отрицательной (многокомпонентной) молнии;

3 – положительная (однокомпонентная) молния;

*- для наземных объектов высотой до 70 метров;

** - для летательных аппаратов.

1.2.2 Геомагнитные бури

Природным аналогом МГД-ЭМИ являются геомагнитные бури. В [1.16 – 1.18] отмечаются сходства и различия между двумя упомянутыми явлениями.

Пространственная зависимость. В случае магнитных бурь пространственная зависимость изменения плотности магнитного потока мало меняется от бури к буре. Это позволяет провести деление на участки по широте и приблизительно смоделировать электрические поля фиксированной поляризации и пространственно инвариантной интенсивности внутри каждого такого участка.

Пространственное распределение полей МГД-ЭМИ зависит от местоположения точки взрыва. Один и тот же взрыв, произведённый в различных точках по широте, даёт различные пространственные распределения.

Интенсивность. Предполагая идентичности моделей земной проводимости, напряжённость электрического поля МГД-ЭМИ внутри определённых географических границ значительно выше, чем во время геомагнитных бурь.

Длительность. Продолжительность влияния магнитных бурь на электроэнергетические системы в отдельных географических регионах составляет от десятков минут до часов, степень интенсивности этого влияния меняется непредсказуемо во время бури. Воздействие МГД-ЭМИ длится не более 400 с. Таким образом, даже определённое число последовательно произведённых взрывов не может воздействовать на энергосистемы дольше, чем геомагнитная буря.

Особенности. Для обоих явлений особенностью является то, что плотность магнитного потока и электрическое поле содержат только низкочастотные компоненты (менее 1 Гц).

Учитывая аналогичность рассматриваемых явлений, можно попытаться оценить, насколько реальную угрозу для энергетических систем представляет МГД-ЭМИ высотного ЯВ, основываясь на имеющихся данных по воздействию наиболее сильных геомагнитных бурь на энергетические системы. В США такая информация собирается и систематизируется с 1968 года. В [1.17, 1.18] суммируется и анализируется представленная в публикациях зарубежных авторов информация о воздействии наиболее сильных из имевших место в последнее время геомагнитных бурь на энергосистемы США и Канады.

В [1.17] анализируются нарушения в работе электроэнергетических систем континентальных США и Канады, вызванные геомагнитной бурей интенсивностью K-8 4 августа 1972 года. Во время указанной бури наблюдались следующие отклонения от нормальной работы энергосистем: изменения активной и реактивной мощности, флуктуация напряжения, сдвиги частоты, сбои в работе систем релейной защиты, сбои в телеметрических системах, системах связи и контроля. Большинство из перечисленных видов отклонений прямо или косвенно связано с присутствием квазипостоянных токов в сердечниках трансформаторов, в несколько раз превышающих среднеквадратические токи намагничивания.

Воздействие бури на энергосистемы было особенно заметным в северных широтах. Наиболее сильные флуктуации параметров функционирования сети отмечены в северной Миннесоте, Северной Дакоте, Манитобе, Ньюфаундленде, Онтарио и Квебеке. В Ньюфаундленде и западной Северной Дакоте наблюдались значительные отклонения от нормальной работы систем. В Гранд-Фоксе, где находится окончание линии связи Манитоба – Северная Дакота, напряжение упало до 64 % номинала. Этого оказалось достаточно для полного вывода из строя системы.

В [1.18] рассматриваются последствия мощной магнитной бури 13 марта 1989 года. Такими последствиями явились полное отключение электроэнергетической системы Hydro Quebec, а также серьезные нарушения в работе других систем Канады и США вплоть до Лос-Анджелеса. Вышел из строя трансформатор 22/500 кВ на атомной электростанции Салем к югу от Филадельфии. На подстанции Медоу-Брук был выведен из эксплуатации автотрансформатор 500/138 кВ. Отмечается, что если бы магнитная буря возникла при большой нагрузке в энергосистемах США, то могла бы произойти каскадная авария на территории Пенсильвании до северо-восточных штатов.

1.2.3 Высоковольтные линии электропередачи

Высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП), находясь в рабочих и аварийных режимах, являются источниками мощных ЭМП. Большое влияние на режимы работы ЛЭП оказывают перенапряжения, которые являются причиной повышения амплитуды наибольшего рабочего напряжения электрической сети и генерирования электромагнитных помех большой мощности даже в рабочих режимах ЛЭП.

Различают внутренние и внешние; коммутационные, квазистационарные и стационарные перенапряжения. Из последних наиболее опасными являются коммутационные перенапряжения, связанные с внезапным изменением схемы или ее параметров (аварийные отключения или включения ЛЭП, трансформаторов и т.д.). Вследствие малых потерь и высокой добротности контуров переходные процессы при коммутациях имеют колебательный характер и могут привести к возникновению значительных перенапряжений.

Частным случаем внешних перенапряжений являются грозовые перенапряжения, которые возникают вследствие воздействия на ЛЭП сторонних эдс или источников тока (молнии). При этом вдоль линии со скоростью света и малыми искажением и затуханием распространяются электромагнитные волны, которые являются источниками мощных ЭМП даже в тех районах, которые удалены от места воздействия молнии. В данном случае проявляется двойное действие ЛЭП, с одной стороны, как источника собственных электромагнитных помех, с другой – привнесенных от иных источников.

Перенапряжения в высоковольтных ЛЭП могут быть причиной аварийных режимов ее работы и стать источником электромагнитных излучений намного большей мощности, чем в рабочих режимах ЛЭП. Наиболее распространенным аварийным режимом ЛЭП является ее короткое замыкание на землю, которое сопровождается резким увеличением токов линии, достигающих пиковых значений порядка десятков и сотен килоампер.

Так как ЛЭП оборудованы быстродействующей защитой, время срабатывания которой составляет около 0.07...0,1 с, то это время и должно быть принято за время воздействия магнитного поля помехи на РЭС при коротком замыкании ЛЭП. При этом напряженность магнитного поля в ЛЭП может достигать значений $100...10^4$ А/м [1.12, 1.13].

1.2.4 Контактная сеть железных дорог

Близкой по своим помехосоздающим свойствам к ЛЭП является контактная сеть железных дорог. Влияние контактной сети на РЭС может быть подразделено на три вида: электрическое – обусловлено потенциалом контактного провода по отношению к земле или заземленным конструкциям; магнитное – обусловлено возникновением в контактной

сети постоянных и переменных тяговых токов и токов короткого замыкания; гальваническое – обусловлено протеканием в земле тяговых токов.

Особую опасность для РЭС представляет контактная сеть в режиме короткого замыкания. Вектор напряженности магнитного поля имеет ту же ориентацию в окружающем провод пространстве, что и при коротком замыкании ЛЭП. Процесс протекания тока короткого замыкания по контактной сети, так же как и в ЛЭП, ограничен во времени срабатыванием защиты. Напряженность магнитного поля вблизи контактного провода может достигать $100 \dots 10^4$ А/м [1.12, 1.13].

1.2.5 Высоковольтные установки

Современное развитие науки и техники немислимо без применения высокоэнергетического оборудования, составной частью которого часто являются высоковольтные установки и устройства. Источники высоких напряжений, например, используются при испытаниях электрической прочности изоляции электротехнического оборудования. Действующие значения испытательного напряжения данных установок лежат в диапазоне от единиц киловольт до единиц мегавольт.

Широко применяются источники импульсных токов как для научных, так и для технологических целей. Их используют при испытаниях электрических сетей в аварийных режимах, а также для проведения различных физических исследований: создания сильных магнитных полей, получения ударных волн и высокотемпературной плазмы. При этом максимальные значения токов достигают десятков и сотен килоампер, а длительности – десятков долей секунд.

В процессе генерирования высоковольтными установками больших токов и напряжений происходит излучение ЭМИ в окружающее пространство. При этом в рабочем объеме напряженности электрических полей достигают значений от единиц до сотен кВ/м [1.12, 1.13].

1.2.6 Мощные радиопередающие средства и радиолокационные станции

Основным источником мощного электромагнитного излучения любых радиоэлектронных средств является антенна, излучающая поток электромагнитной энергии в окружающее пространство. Антенны радиолокационных станций (РЛС) в этом отношении наиболее опасные источники мощного излучения, так как обладают свойством концентрировать электромагнитную энергию в определенном направлении.

Мощные радиопомехи источников данного вида охватывают достаточно широкий, от десятков герц до десятков гигагерц, частотный диапазон и являются гармоническими сигналами, модулированными по амплитуде и частоте.

Радиолокационное оборудование и связная аппаратура, работающие в диапазоне от низких до высоких частот, могут создавать и внутренние мощные электромагнитные помехи через отверстия, неоднородности в экранах линий передачи. При этом напряженности полей могут достигать значений от десятков до тысяч вольт на метр.

Напряженность электрического поля радиопередающих средств может достигать значений 20...2000 В/м в диапазоне частот 1...300 МГц. Плотность потока энергии полей излучения РЛС в диапазоне частот 300...3000 МГц составляет 0,20...200 Вт/м². Станции навигационных систем могут создавать плотность потока энергии до 4500 Вт/м² [1.32 – 1.34].

1.2.7 Сверхширокополосные электромагнитные импульсы

Определение сверхширокополосного ЭМИ

Понятие «сверхширокополосный» (СШП) впервые было официально введено в 1990 г. Комиссия Управления перспективных военных НИОКР Минобороны США (DAPRA) для разделения радиотехнических систем по занимаемой ими полосе частот ввела общее определение относительной полосы частот:

$$\eta = \frac{(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)}, \quad (1.16)$$

где f_h и f_l – верхняя и нижняя границы спектральной полосы по уровню –10 дБ (–10 дБ соответствует уровню 0,7).

В соответствии с этим определением системы или сигналы, имеющие $\eta \leq 0,01$, отнесены к узкополосным; $0,01 < \eta \leq 0,25$ – к широкополосным; $0,25 < \eta \leq 1$ – к сверхширокополосным (СШП – UWB). Это определение в настоящее время широко используется в отечественной и зарубежной литературе.

Данное определение было скорректировано Федеральной комиссией связи (FCC) США в 2000 году. По определению FCC, к СШП относятся все системы со спектральной полосой не менее 1,5 ГГц, а также устройства у которых ширина спектральной полосы по уровню –10 дБ составляет, по крайней мере, 25 % от значения центральной частоты.

В стандарте МЭК 61000-2-13 [1.10] для классификации сигналов вводится процентная ширина спектра (percent bandwidth):

$$\text{pbw} = 2 \frac{(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)}. \quad (1.17)$$

Стандарт определяет следующие типы электромагнитных сигналов в зависимости от процентной ширины спектра:

- узкополосный сигнал (narrowband signal) – $\text{pbw} < 1\%$ (например, радиосигнал с амплитудной модуляцией (AM)),

- сигнал со средней шириной спектра (moderate bandwidth signal) – $1\% < pbw < 25\%$ (например, телевизионный сигнал),
- сверхширокополосный (СШП) сигнал (ultrawideband (UWB) signal) – $pbw > 25\%$.

Оставляя в стороне вопрос, какое определение лучше, будем придерживаться определения МЭК, поскольку в ближайшем будущем планируется национальные стандарты приводить в соответствие с международными.

Амплитудно-временные параметры и форма СШП-ЭМИ

В стандарте МЭК 61000-2-13 приводятся также примеры типовых форм СШП ЭМИ. К СШП из них следует отнести полупериод синусоиды, период синусоиды, двухэкспоненциальный импульс и гауссовский импульс. Дадим описание этих импульсов.

Импульс в виде полуволны синусоиды (Рис. 1.20). Длительность T этого импульса по основанию составляет 1 нс. Форма импульса (Рис. 1.20,а) описывается выражением

$$a(t) = \sin(\omega_0(t-T)) \cdot v(t-T) \text{ при } 0 \leq t \leq (3T/2), \quad (1.18)$$

а энергетический спектр (Рис. 1.20,б) – выражением

$$|A(f)| = \left| \frac{2\omega_0 \cos\left(\frac{\omega T}{4}\right)}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \right|, \quad (1.19)$$

где ω_0 – фундаментальная частота, $\omega_0 = 2\pi f_0$,

Типовые значения частоты $f_0 = 1$ ГГц, длительности импульса по его основанию $T = 1$ нс.

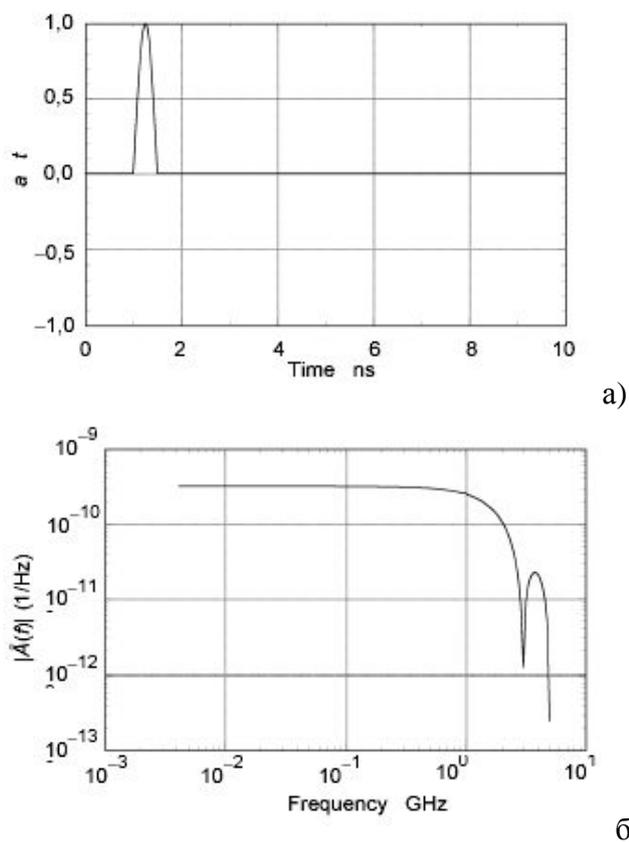


Рис. 1.20. Сверхширокополосный импульса в виде полупериода синусоиды: а – форма импульса, б – спектр импульса

Импульс в виде периода синусоиды (Рис. 1.21). Длительность $2T$ этого импульса по основанию составляет 21 нс. Форма импульса (Рис. 1.21а) описывается выражением

$$a(t) = \sin(\omega_0(t-T)) \cdot v(t-T) \text{ при } 0 \leq t \leq 2T, \quad (1.20)$$

а энергетический спектр (Рис. 1.21б) – выражением (1.19).

Типовые значения частоты $f_0 = 1$ ГГц, длительности импульса по его основанию $2T = 2$ нс.

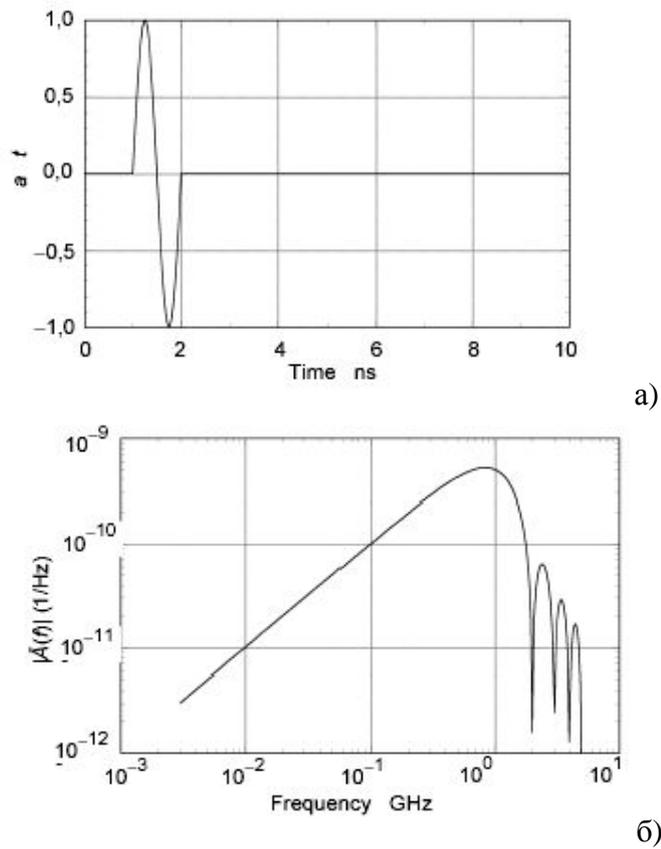


Рис. 1.21. Сверхширокополосный импульс в виде синусоиды: а – форма импульса, б – спектр импульса

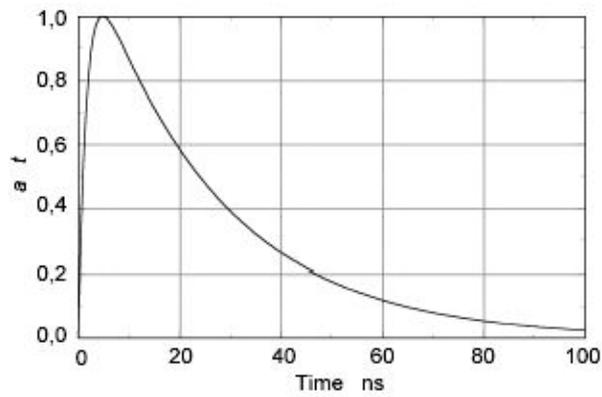
Двухэкспоненциальный импульс (Рис. 1.22). Длительность фронта импульса составляет около 1 нс. Форма импульса (Рис. 1.22а) описывается выражением

$$a(t) = 1,31(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})v(t), \quad (1.21)$$

а энергетический спектр (Рис. 1.22б) – выражением

$$|A(f)| = \left| \frac{1,31(\beta - \alpha)}{(\alpha + j\omega)(\beta + j\omega)} \right|, \quad (1.22)$$

где $\alpha = 4 \cdot 10^7$ рад/с, $\beta = 6 \cdot 10^8$ рад/с



а)

Взять в стандарте

б)

Рис. 1.22. Сверхширокополосный двухэкспоненциальный импульс: а – форма импульса, б – спектр импульса

Гауссовский импульс (Рис. 1.23). Длительность импульса на полувысоте составляет около 0,5 нс. Форма импульса (Рис. 1.23,а) описывается выражением

$$a(t) = e^{-\left(\frac{2(t-t_s)}{\alpha}\right)^2}, \quad (1.23)$$

где $\alpha = 0,5$ нс при $t_s = 0$.

а энергетический спектр (Рис. 1.23б) – выражением

$$|A(f)| = \sqrt{\frac{\pi\alpha^2}{4}} \cdot \exp\left(-\frac{(f \cdot \alpha)^2}{16}\right). \quad (1.24)$$

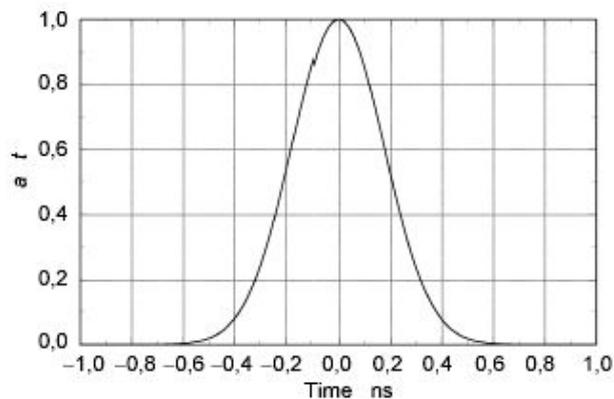


Рис. 1.23. Сверхширокополосный гауссовский импульс: а – форма импульса, б – спектр импульса

Энергетический спектр СШП-ЭМИ

На Рис. 1.24 представлены характеристики различных типов электромагнитного излучения, а именно:

- грозовой разряд;
- ЭМИ высотного ЯВ;
- сверхширокополосный ЭМИ;
- узкополосный ЭМИ.

Частотный диапазон от сотен мегагерц до гигагерц включает в себя помехи искусственного неядерного происхождения. Это как раз сфера, на которую распространяется упомянутый выше стандарт МЭК 61000-2-13. В нем рассматриваются мощные электромагнитные воздействия (НРЕМ – High power electromagnetic). Более определенно: к НРЕМ относятся электромагнитные излучения искусственного происхождения с пиковым электрическим 100 В/м (что соответствует плотности потока энергии $26,5 \text{ Вт/м}^2$) в частотном диапазоне от сотен мегагерц до нескольких гигагерц. Выбор такого частотного диапазона связан с тем, что достаточно интенсивные сигналы в диапазоне от 200 МГц до 5 ГГц вызывают повреждения во многих системах, а также с возможностями современных излучателей. Данный стандарт рассматривает СШП как часть НРЕМ, куда входят также другие виды воздействий в том же частотном диапазоне, например узкополосные излучения (НРМ – High power microwave).

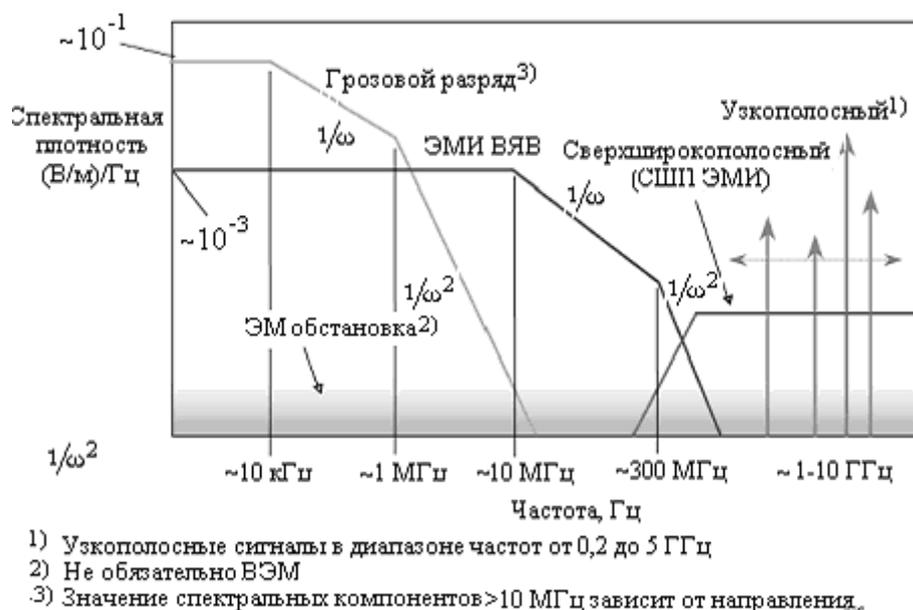


Рис. 1.24. Различные типы электромагнитной обстановки: 1 – узкополосные сигналы в диапазоне от 0,2 до 5 ГГц, 2 – значение спектральных компонентов зависит от направления

Таким образом, с точки зрения стандарта МЭК 61000-2-13 под СШП ЭМИ понимаются импульсные электромагнитные поля искусственного неядерного происхождения со следующими параметрами:

- $pbw > 25 \%$;
- амплитуда электрического поля – 100 В/м и более;
- частотный диапазон – от сотен мегагерц до нескольких гигагерц.

Важно учесть, что на расстоянии R от источника мощность ЭМИ зависит от технологии создания аппаратуры и совершенности конструкции антенны. Разработанные в настоящее время излучатели СШП ЭМИ создают поля напряженностью до 100 кВ/м.

1.2.8 Генераторы микроволнового излучения

Микроволновое излучение (МВМ) – это электромагнитное излучение наносекундной и микросекундной длительности в узкой полосе частот, расположенной между 500 МГц – 50 ГГц [1.27 – 1.30].

В 1962 году во время американского испытательного высотного взрыва ядерного заряда на Гавайях погасло уличное освещение. Автоматика, контролирующая включение и выключение фонарей, оказалась выведена из строя мощным электромагнитным импульсом, излучаемым во время ядерного взрыва. Так произошло первое применение микроволнового оружия.

Микроволновый импульс высокой мощности можно получить и в результате подрыва обычного взрывчатого вещества. Для этого используется катушка индуктивности, сердечник которой заполнен взрывчаткой. Волна детонации при подрыве

распространяется вдоль сердечника, его оболочка резко расширяется. В обмотке катушки возникает короткое замыкание, зона которого точно так же распространяется вдоль сердечника. Меньше чем за секунду амплитудные значения тока достигают десятков миллионов ампер. Через формирующее устройство электромагнитный импульс излучается в окружающее пространство. Его энергия может возрасти до десятков миллионов джоулей. Такой электромагнитный разряд сравним с ударом молнии.

Кроме взрывного генератора микроволновый импульс может генерироваться электронными устройствами. Антенны современных радиолокационных станций излучают 0,7 – 1,0 МВт при продолжительности импульса в микросекунды. Если время излучения сократить еще в тысячу раз – до наносекунд, мощность возрастет соответственно до десятков и сотен гигаватт.

Близкий удар молнии способен вывести из строя радиоэлектронные устройства. Микроволновый импульс высокой мощности еще более разрушителен. Электронная начинка современной аппаратуры чрезвычайно чувствительна к микроволновому излучению. В зависимости от дальности облучения и его мощности работа электронных систем может блокироваться, подвергаться риску повреждения или даже полного выхода из строя. Микроволновое излучение сжигает дорожки микросхем, реле и другие элементы. Проникает через антенны, датчики и распространяется в аппаратуре, повреждая электронные компоненты. При этом не имеет значения, работает в это время система или нет.

В тех случаях, когда аппаратура защищена от внешнего излучения и не имеет открытого принимающего компонента (антенны), микроволновое излучение проникает через "черный ход" - кабели, провода, трубопроводы, любые проемы и технологические отверстия в защитных кожухах. Коварство электромагнитного оружия состоит еще и в том, что могут понадобиться дни, а то и недели, чтобы обнаружить повреждения в сложных системах.

Микроволновое оружие не требует точного прицеливания – оно бьет по площадям, что позволяет поражать одновременно группу целей. Площадь поражения зависит в первую очередь от диаграммы направленности излучающей антенны, частоты импульса и дальности до цели.

На основе взрывного генератора электромагнитного потока в ближайшее время могут быть созданы в первую очередь авиационные боеприпасы. Наиболее вероятно, что это будут тяжелые авиабомбы в 1 тыс. кг и более, специально предназначенные для выведения из строя наземных зенитно-ракетных комплексов.

Разлет осколков такого боеприпаса будет меньше, чем у обычного, но это не имеет

решающего значения. Подобная авиабомба может оказаться дешевле современных высокоточных боеприпасов, поскольку здесь не требуется попадания в цель. Отпадает надобность и в специальных противорадиолокационных ракетах, которые наводятся по излучению РЛС. Для поражения цели достаточно крылатой ракеты, нацеленной на приблизительно разведанный район дислокации противника, или ракеты "воздух-земля", выпущенной с самолета по приблизительно координатам обнаруженной цели. Точно так же могут поражаться узлы связи и управления, в том числе скрытые под землей.

В апреле 2001 года США провели натурные испытания микроволнового оружия. Испытания были удачными. С расстояния в несколько сотен метров пучок электромагнитных волн направили на движущийся грузовик. Электронная система зажигания автомобиля тут же вышла из строя, и он остановился.

Также с помощью микроволнового оружия можно решить проблему защиты боевой техники от высокоточных ракет противника. Сейчас самолеты снабжаются в качестве средств защиты дипольными отражателями и инфракрасными ловушками. Но эти средства защищают только от ракет с радиолокационным и тепловизионным наведением, уже морально устаревших. Современные средства поражения воздушных целей наводятся по лазерному лучу или силуэту на фоне неба. Вот от них как раз и способен защитить бортовой комплекс микроволнового оружия. Располагаться он может как внутри фюзеляжа самолета, так и во внешнем подвесном контейнере. Электропитание способен получать от бортовой энергетической установки (двигателя). Как только система предупреждения самолета выдаст информацию о приближающейся ракете, в ее направлении излучается поток энергии большой мощности. Поскольку этот поток имеет форму конуса, он может использоваться по групповым целям и не нуждается в точном наведении. Точно так же можно защищать от высокоточного и управляемого оружия танки, другую наземную технику, боевые корабли и самые различные объекты.

В октябре 2001 года на авиабазе Киртленд прошли первые испытания микроволнового оружия на людях. Группа добровольцев проверила на себе действие мощного электромагнитного импульса. Эффект оказался потрясающим. Лучи с длиной волны 3 мм проникают в тело человека всего на 0,3...0,4 мм, но при этом почти мгновенно начинают закипать молекулы воды и крови в подкожном слое. В этот момент человек испытывает острейшую боль. Кожный покров разогревается до 45...50 градусов, что превышает болевой порог человека. В таком состоянии остается только одно желание – как можно скорее покинуть зону действия микроволнового излучения. При выходе за пределы луча боль тут же прекращается. Повреждений и ожогов кожи не остается.

К 2005 году была изготовлена микроволновая пушка "Шериф" для разгона толпы. В

качестве излучателя использовалась параболическая антенна, типа спутниковой, диаметром до двух метров. Длина волны – 3 мм, дальность действия 1 км.

После опробования микроволновой установки "Шериф" на улицах иракских городов такие же микроволновые пушки предполагается разместить на кораблях ВМС США для защиты от террористов. После подрыва в 1990 году в йеменском порту эсминца "Коул" стала очевидной необходимость иметь на судах генераторы микроволнового излучения.

В Германии разрабатывается микроволновое оружие для беспилотного летательного аппарата "Тайфун". Кроме того, реализуется еще целый ряд проектов, в том числе создание артиллерийского снаряда с взрывным генератором электромагнитного излучения.

В Таблица 1.5 приведены основные параметры микроволнового излучения (МВИ) от разработанных в настоящее время генераторов СВЧ-излучения [1.28 – 1.30].

Таблица 1.5. Характеристики генераторов и параметры микроволнового излучения

Характеристики генераторов	Параметры МВИ
Пиковая мощность в антенне	10 кВт – 20 ГВт
Длительность импульса на уровне 0,5 амплитуды	200 пс – 10 мкс
Энергия на выходе генератора	100 Дж – 20 кДж
Диапазон частот	500 МГц – 10 ГГц
Напряженность электрического поля	1 кВ/м – 100 кВ/м
Энергия (на м ²) на дальности 100 м	1 – 20 Дж
Мощность (на м ²) на дальности 100 м	1 Вт – 200 МВт
Пиковое поле на дальности 100 м	20 – 300 кВ/ м
Частота повторения импульсов	250 Гц – 1000 Гц
Частота следования импульсов в пачке	0,5 – 15 ГГц
Длительность пачки	1 мкс
Частота следования пачки импульсов	1 кГц
Несущие частоты	1,3 ГГц, 2,86 ГГц, 5,71 ГГц, 9,30 ГГц, 15 ГГц
Типы поляризации излучения	вертикальная, горизонтальная, круговая
Облучаемая поверхность	менее 1 км ²
Дальность	единицы км
Метод излучения	антенна

1.2.9 Электростатические разряды

Поле электростатического заряда может вызвать повреждения электронного оборудования и отдельных компонентов. В этом плане более опасными являются эффекты, имеющие место при электростатических разрядах (ЭСР) [1.21]. В результате электростатического разряда возникает кратковременный электрический импульс, протекающий в искровом промежутке. Он вызывает ток разряда в проводниках, амплитуда которого изменяется во времени как показано на Рис. 1.25. В свою очередь

разрядный ток генерирует переменное электромагнитное поле.

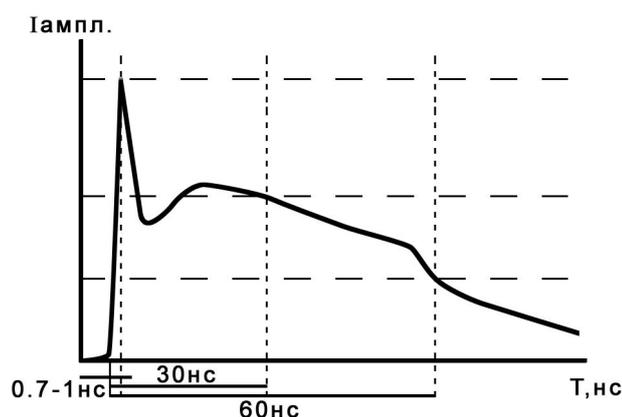


Рис. 1.25. Кратковременный переменный по амплитуде электромагнитный импульс тока при ЭСР

Если вблизи разряда находится проводящий контур, то это переменное поле в результате *электромагнитной индукции* наводит в контуре электрический ток. Электродвижущая сила e наведенного тока согласно закону электромагнитной индукции Фарадея равна:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.25)$$

где $\Phi = B \cdot S$ – магнитный поток через некоторую поверхность с площадью S ; B – магнитная индукция.

Единицей магнитной индукции является тесла ($\text{Тл} = \text{Н}/\text{А} \cdot \text{м}$).

Магнитное поле тока, индуцированного в проводнике, направлено так, чтобы компенсировать изменение потока внешнего магнитного потока. Поэтому при увеличении магнитного потока, когда $d\Phi/dt > 0$, индуцированная эдс $e < 0$, а при его уменьшении, когда $d\Phi/dt < 0$, получаем $e > 0$. Этим обусловлено появление знака минус в выражении (1.25).

Из выражения (1.25) следует, что эдс, наведенная электромагнитным полем, возникающем при электростатическом разряде, имеет наибольшие значения в моменты крутого нарастания и спада амплитуды электромагнитного импульса.

Ток, протекающий по проводнику, создает вокруг себя магнитное поле, причем линии его магнитной индукции представляют собой концентрические окружности, центры которых находятся на проводнике. Магнитная индукция рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r}, \quad (1.26)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м – магнитная постоянная; μ_r – относительная магнитная

проницаемость среды; I – сила тока, А; r – расстояние от проводника до точки, где определяется B , м.

Вызванный электростатическим разрядом импульс тока с силой тока I и длительностью Δt , протекающий по прямолинейному бесконечно длинному проводнику (Рис. 1.26), индуцирует в контуре с площадью S электродвижущую силу, которую приближенно можно оценить следующим образом:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \approx \frac{\Delta B}{\Delta t} S. \quad (1.27)$$

При этом плоскость контура должна быть нормальна вектору магнитного поля. Изменение магнитной индукции рассчитывается по формуле (1.29), считая, что в начальный момент $B = 0$.

Несмотря на то, что оценки по выражениям (1.26) и (1.27) носят приближенный характер, рассмотренная модель дает результаты, достаточно хорошо согласующиеся с измерениями внутри корпусов приборов с помощью миниатюрных зондов.

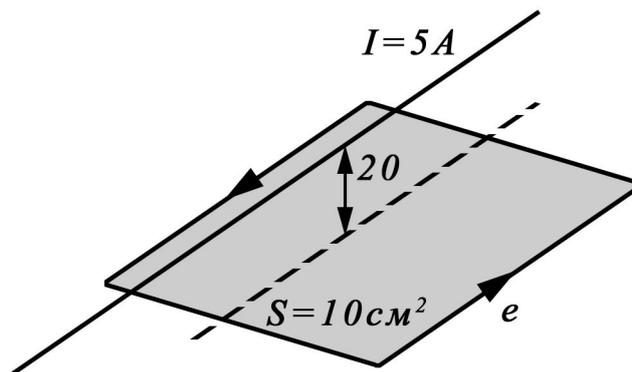


Рис. 1.26. Схема для расчета наведенной эдс

Рассмотрим действие электромагнитного поля на электронное оборудование при электростатическом разряде. В качестве примера возьмём оператора, идущего по изолированному полу, тело которого заряжается статическим электричеством при перемещении. Если поле статического заряда на теле оператора достаточно интенсивное, то при приближении его руки к шасси электронного прибора будет происходить электростатический разряд.

Между рукой и шасси прибора возникает кратковременная электрическая искра. Кратковременный импульс тока разряда протекает по корпусу прибора, а обратную цепь образует плоскость пола. Поскольку речь идет о достаточно протяженном и “размытом” пути тока, его не имеет смысла представлять в виде точечного источника. Если считать, что импульс тока протекает по прямолинейному проводнику, можно использовать

выражения (1.26) и (1.27) для оценки эдс, наводимой в каком-либо контуре цепи прибора.

В качестве примера определим наведённую эдс в контуре, расположенном на расстоянии равном 20 мм от оси тока (см Рис. 1.26). Площадь контура равна 10 см^2 . Ток достигает 5 А при ЭСР длительностью 1 нс.

В этих условиях, принимая для воздуха $\mu_r = 1$, магнитная индукция, рассчитанная по формуле (1.26) составляет $B = 2.5 \cdot 10^{-7} / 0,02 = 5 \cdot 10^{-5}$, Тл.

Эдс, наведенная в контуре, согласно (1.27) равна

$$e \approx \frac{\Delta B}{\Delta t} S = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{10^{-9}} \times 10 \cdot 10^{-4} = 50, \text{ В.} \quad (1.28)$$

Полученное значение намного превосходит чувствительность современных логических схем к помехам. Но, поскольку наведенные напряжения очень кратковременны, необходимо учитывать реальную динамическую помехоустойчивость используемых логических схем к коротким импульсам. Например, относительно медленные ТТЛ-схемы не могут быть нормально переключены сигналом с длительностью меньше 10 нс. Такой импульс способен к активизации микросхем только при достаточно большой амплитуде (необходимо выделить мощность в несколько нДж). При повышении быстродействия микросхем этот порог снижается. Можно сравнить спектр импульса ЭСР с полосой пропускания различных схем. При этом необходимо отметить, что форма помех, наведенных этим излучением, может отличаться от формы импульса разрядного тока. Кроме того надо иметь ввиду, что свыше определенного уровня (30...50 В для некоторых схем) достигается порог необратимого ухудшения качества работы.

Полярность напряжения, как и направление разрядного тока, не имеет большого значения. В случае, когда помеха возникает на входе логической схемы, изменение направления входного тока задается направлением поля. Вход логической схемы чувствителен к положительному импульсу, когда он находится в состоянии логического "0", и к отрицательному импульсу – в состоянии "1". Тогда в зависимости от последовательности числовых операций, происходящих точно в момент разряда, схема становится уязвимой для той, или иной полярности.

Наведенные помехи могут распространяться внутрь аппаратуры сквозь неоднородности в металлических стенках. Можно предположить, что при высокой частоте (300 МГц и более), на которую распространяется спектр ЭСР, поверхностный эффект должен вытеснять ток на наружные стенки экранов, обеспечивая высокую эффективность экранирования. Это было бы правильно, если бы корпус имел идеальную однородность, что достигается в редких случаях. Щели, разрывы и кабельные вводы создают значительные неоднородности для высоких частот, что существенно снижает

эффективность экрана. Можно восстановить целостность экрана методами, которые будут обсуждаться в последующих разделах, но тогда остается другое серьезное проявление электростатической связи: помехи во внешних цепях.

При рассмотрении этого явления (Рис. 1.27) необходимо учитывать следующее.

Электромагнитное поле, существующее вне прибора, обычным образом наводит в кабелях токи тем более опасные, чем выше их частота, причем подавление этих возмущений во входных устройствах (приемниках, трансформаторах, дифференциальных усилителях и др.) практически равно нулю.

Эти кабели чаще всего идут к соседним приборам, электрически соединяя их корпуса с корпусом прибора, который подвергся воздействию электростатического разряда.

При использовании экранированных кабелей все будет зависеть от переходного сопротивления экранов и качества их присоединения к корпусу. Например, при рассматриваемых частотах коаксиальный кабель имеет переходное сопротивление не менее 1 Ом. При этом на центральной жиле будут наведены напряжения в несколько вольт. В случае экранированных линий, которые соединяются с корпусом только на одном конце экрана, все успешно решается при низких частотах и становится катастрофическим при электростатических разрядах, причем плавающий конец может приобрести потенциал в десятки и даже сотни вольт. Естественно, прикосновение персонала к такому концу экрана может быть опасно для жизни и здоровья персонала.

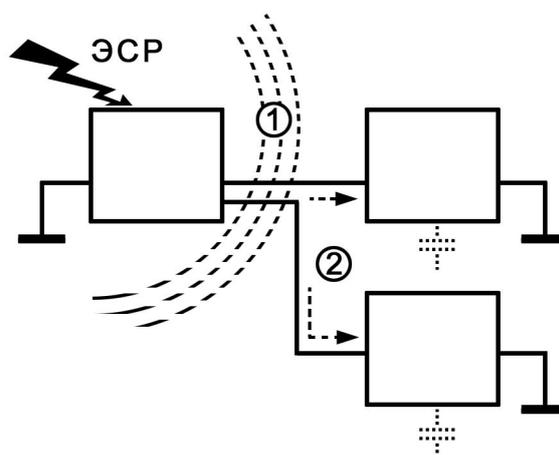


Рис. 1.27. Роль внешних цепей в распространении помех от электростатических разрядов: 1 - поле, излучаемое вблизи разряда, охватывает кабели и наводит в них токи; 2 - часть разрядного тока замыкается на землю через эти кабели, непосредственно создавая помехи при использовании неэкранированных кабелей или создавая их через переходное сопротивление в случае экранированных кабелей.

1.2.10 Технические средства намеренного силового воздействия

Проблема намеренных силовых воздействий на радиоэлектронные средства в последние годы приобрела большое значение в связи с развитием техники генерации, усиления и излучения мощных ЭМИ. Для более четкого рассмотрения этой проблемы

используем следующие основные базовые термины.

Намеренное силовое электромагнитное воздействие – намеренное силовое воздействие с применением излучателей электромагнитного поля, генераторов напряжения и тока, путем генерирования в информационных системах электромагнитной энергии с уровнем, вызывающим нарушение нормального функционирования (сбои в работе) технических и программных средств информационных систем (по ГОСТ 50922).

Намеренное силовое воздействие по сети электропитания – преднамеренный всплеск напряжения в сети электропитания, создаваемый с помощью специальных технических средств (ТС) намеренного силового воздействия, причём специальное техническое средство подключается к сети непосредственно с помощью гальванической связи, через конденсатор или трансформатор.

Намеренное силовое воздействие по проводным линиям связи – преднамеренный всплеск напряжения в проводных линиях связи (каналах передачи цифровой и аналоговой информации), создаваемый с помощью специальных технических средств намеренного силового воздействия, причём специальное техническое средство подключается к линии непосредственно с помощью гальванической связи, через конденсатор или трансформатор.

Намеренное силовое воздействие по металлоконструкциям зданий – преднамеренный всплеск напряжения в металлоконструкциях зданий, создаваемый с помощью специальных технических средств намеренного силового воздействия, причём специальное техническое средство подключается к металлоконструкциям зданий непосредственно с помощью гальванической связи, через конденсатор или трансформатор. Параметры силовых электромагнитных воздействий подробно изложены в [1.35].

Испытательные электромагнитные воздействия по сети электропитания имеют следующие параметры [1.35]:

- всплеск сетевого напряжения с кратностью перенапряжения до 1,5...1,7, длительность воздействия до 60 с, пиковая мощность до 10...100 кВА;
- импульс напряжения длительностью до 5...20 мс и амплитудой до 1 кВ, импульсный ток до 5-10 кА, энергия накопителя до 10...150 кДж, интервал между импульсами более 60 с;
- импульс напряжения длительностью 0,1...2 мс и амплитудой до 3 кВ, импульсный ток до 5...10 кА, энергия накопителя 1...50 кДж, интервал между импульсами более 60 с;

- импульс напряжения длительностью 50...100 мкс и амплитудой до 5кВ/5кА, наложен на низковольтный импульс напряжения длительностью до 1...20 мс и амплитудой до 1кВ/20кА, энергия накопителя 5...200 кДж, интервал между импульсами более 60 с;
- импульс напряжения длительностью 1...10 мкс и амплитудой до 50...250 кВ, импульсный ток до 0,5...1 кА, энергия накопителя 10...250 Дж, интервал между импульсами более 60 с;
- пачка импульсов тока, следующих с частотой до 1 кГц, амплитуда импульса 0,5...1 кА, длительность импульса 0,2...0,5 мс, длительность пачки импульсов 1 с.

Параметры испытательных электромагнитных воздействий по проводным линиям связи (сигнальным кабелям) имеют следующие значения.

- импульс напряжения длительностью 0,1...1 мс и амплитудой до 1 кВ, импульсный ток до 0,5...1 кА; энергия накопителя до 0,5...5 кДж, интервал между импульсами не более 60 с;
- импульс напряжения длительностью 10...50 мкс и амплитудой до 3 кВ, импульсный ток до 0,5...1 кА, энергия накопителя 0,25...2 кДж, интервал между импульсами не более 60 с;
- импульс напряжения длительностью 10...100 нс и амплитудой до 50...250 кВ, импульсный ток до 0,5...1 кА, энергия накопителя 10...250 Дж, одиночные импульсы или пачки импульсов с частотой следования импульсов 10...100 Гц, интервал между одиночными импульсами более 60 с, длительность пачки импульсов 1...10 с.

Параметры испытательных электромагнитных воздействий по металлоконструкциям имеют следующие параметры.

- ток с частотой сети электропитания, действующее значение до 0,1...1 кА, длительное воздействие;
- пачки импульсов тока длительностью 5...10 мс и амплитудой до 1...5 кА, частота повторения до 1 Гц, длительность пачки импульсов до 60 с, интервал между пачками импульсов 5...10 минут;
- импульс тока длительностью 5...50 мс и амплитудой до 1...3 кА, энергия накопителя 1...200 кДж, интервал между импульсами более 60 с;
- импульс тока длительностью 0,1...1 мс и амплитудой до 1...5 кА, энергия накопителя 5...10 кДж, интервал между импульсами более 60 с;
- импульс напряжения длительностью 0,1...1 мкс и амплитудой до 50...200 кВ, импульсный ток до 0,5...1 кА, энергия накопителя 10...50 Дж, одиночные импульсы или пачки импульсов с частотой следования импульсов 10...100 Гц, интервал между одиночными импульсами более 60 с, длительность пачки импульсов 1...10 с.

1.2.11 Сравнение параметров ЭМИ ЯВ и полей от источников природного и техногенного происхождения

Электромагнитный импульс ядерного взрыва

1. Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва:

- $E = 50$ кВ/м,
- длительность фронта 2,3 нс,
- длительность импульса (на уровне 0,5) 23 нс.
- магнитное поле 133 А/м [1.7].

2. Электромагнитный импульс наземного ядерного взрыва:

- вертикальное электрическое поле $E_z = 50 \dots 100$ кВ/м,
 - длительность фронта 10 нс,
 - длительность импульса (на уровне 0,5) 10 мс.
- радиальное электрическое поле $E_r = 100 \dots 200$ кВ/м,
 - длительность фронта 10 нс,
 - длительность импульса (на уровне 0,5) 1 мс,
- азимутальное магнитное поле $E_h = 3 \dots 5$ кА/м,
 - длительность фронта 100 нс,
 - длительность импульса (на уровне 0,5) 1 мс [1.4].

Электромагнитные поля источников природного и техногенного происхождения

3. Бытовые приборы – напряженность поля до 3 В/м [1.19, 1.20].

4. Промышленное оборудование – напряженность поля до 10 В/м [1.19, 1.20].

5. Молния на поверхности земли:

- напряженность электрического поля 10...100 кВ/м, в облаке – 100...500 кВ/м;
- напряженность магнитного поля 50...100А/м;
- ток 100...200 кА,
- длительность фронта 0,25...10 мкс,
- длительность импульса 10...100 мкс, [1.12 – 1.15].

6. Радиолокационные и радиопередающие станции:

- напряженность электрического поля 20...2000 В/м, частоты 1,0...300 МГц,
- мощность 10...4500 Вт/м², частоты 300 МГц – 40 ГГц [1.32 – 1.34].

7. Линии электропередач:

- напряженность электрического поля $10^3 \dots 10^4$ В/м,
- напряженность магнитного поля $10^2 \dots 10^4$ А/м,
- длительность импульса 0,1 с [1.12, 1.13].

8. Контактная сеть железных дорог:
 - напряженность электрического поля $10^3 \dots 10^4$ В/м,
 - напряженность магнитного поля $10^2 \dots 10^4$ А/м,
 - длительность импульса 0,1 с [1.12, 1.13].
9. Высоковольтные установки:
 - напряженность электрического поля 10...300 кВ/м.
 - напряжение холостого хода 0,5...4,5 кВ,
 - ток короткого замыкания 10 кА,
 - длительность импульса 1,2/50 мкс, 10/700 мкс [1.12, 1.13].
10. Излучатели сверхширокополосных импульсов:
 - напряженность электрического поля 1...100 кВ/м,
 - длительность фронта 0,1...0,5 нс,
 - длительность импульса 0,5...1 нс [1.28 – 1.30].
11. Микроволновые источники высокой мощности
 - напряженность электрического поля 1...100 кВ/м,
 - частота повторения импульсов до 1 кГц,
 - несущая частота 1...15 ГГц [1.27 – 1.31].
12. Радиочастотное оружие:
 - напряженность электрического поля 30 В/м (на расстоянии 1 км),
 - частота 1...5 ГГц [1.28].
13. Электромагнитное оружие:
 - напряженность электрического поля 50...100 кВ/м,
 - длительность импульса на уровне 0,5 составляет 0,2...1 нс. [1.28].
14. Средства радиоэлектронной борьбы: напряженность электрического поля 10...100 В/м (на расстоянии 100 км) [1.28].
15. Электростатические разряды:
 - потенциал 2...100 кВ,
 - длительность фронта 1...10 нс,
 - длительность импульса 60...100 нс,
 - ток разряда 5...70 А,
 - сопротивление цепи разряда 50...500 Ом [1.21].
16. Летательные аппараты:
 - напряженность электрического поля 50...2000 В/м,
 - частота 10 кГц...40 ГГц [1.32, 1.33].

17. Технические средства намеренного силового воздействия:

- импульс тока длительностью 5...50 мс:
 - амплитуда до 1...3 кА,
 - энергия накопителя 1...200 кДж,
 - интервал между импульсами более 60 с,
- импульс тока длительностью 0,1...1 мс:
 - амплитуда до 1...5 кА,
 - энергия накопителя 5...10 кДж,
 - интервал между импульсами более 60 с,
- импульс напряжения длительностью 0,1...1 мкс:
 - амплитуда до 50...200 кВ,
 - импульсный ток до 0,5...1 кА
 - энергия накопителя 10...50 Дж
- одиночные импульсы или пачки импульсов с частотой следования импульсов 10...100 Гц.
 - интервал между одиночными импульсами более 60 с,
 - длительность пачки импульсов 1...10 с [1.35]

1.3 РЕЗЮМЕ

Проблема защиты технических систем и объектов от действия мощных электромагнитных помех фундаментальна, актуальна, сложна и многогранна. Базируется с одной стороны на фундаментальных исследованиях физики явления, механизмов взаимодействия полей с объектами, а с другой стороны на возможностях методов воспроизведения, испытаний и существующих средств защиты.

Проблема не решена. Исследования проводятся, физика уточняется, испытания объектов на имитаторах продолжаются. Завершается разработка комплекса международных стандартов по ЭМИ большой энергии.

Решение этих проблем проводится по следующим направлениям:

- задание требований по параметрам помех;
- создание и модернизация имитаторов, генераторов помех и средств измерений;
- проведение испытаний;
- разработка методов и средств защиты;
- обеспечение ЭМС технических систем.

1. ЭМИ ядерного взрыва.

ЭМИ имеет крутой фронт, большие размеры зон воздействия полей на поверхности

Земли и в воздухе, наводит большие амплитуды импульсов напряжения и тока в технических системах. Экспериментальные данные натуральных взрывов свидетельствуют о выходе из строя систем связи и энергоснабжения на расстояниях от 100 до 2000 км от эпицентра взрыва. Основные сведения по параметрам ЭМИ ВЯВ изложены в стандарте МЭК 61000-2-9, по токам и напряжениям в МЭК 61000-2-10.

2. Источники электромагнитных помех естественного и искусственного происхождения: молнии и геомагнитные бури, излучения РЛС и РПС, промышленные помехи ЛЭП, КСЖД, высоковольтные установки ЭМИ ЯВ, генераторы сверхширокополосного и микроволнового излучения, электростатические разряды, технические средства намеренного силового воздействия.

3. Сверхширокополосное излучение.

Анализ параметров существующих генераторов СШП ЭМИ и перспективных разработок показывает, что методы оценки устойчивости ТС и требования к средствам защиты их от СШП ЭМИ должны разрабатываться, исходя из следующих параметров ЭМП:

- 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.

4. Микроволновое излучение.

Микроволновое излучение (МВМ) – это электромагнитное излучение наносекундной и микросекундной длительности в узкой полосе частот, расположенной между 500 МГц – 10 ГГц. Пиковая мощность в антенне 10 кВт – 20 ГВт, энергия на выходе генератора 100 Дж-20 кДж, напряженность электрического поля 1 кВ/м – 100 кВ/м, частота повторения импульсов до 1 кГц, несущая частота 1...15 ГГц.

Сравнение параметров ЭМИ ЯВ и источников полей естественного и искусственного происхождения показывает, что источник ЭМИ ВЯВ имеет большие размеры (сотни – тысячи километров), высокие уровни напряженности электрического поля (сотни киловольт на метр), крутой фронт (единицы наносекунд).

5. Параметры электромагнитных факторов являются основой для разработки методов расчета воздействия, стандартов, методов и средств воспроизведения, испытаний и защиты.

Рис. 1.1. Временная форма гамма-излучения высотного (сплошная линия) и наземного (штриховая линия) атомного взрыва: 1 – мгновенный компонент; 2 – гамма-излучение, рождаемое при неупругом рассеянии нейтронов; 3 – изомерное излучение; 4 – излучение, рождаемое при захвата нейтронов; 5 – осколочное излучение (мощность взрыва 20 кт, удаление от места взрыва 390 м).....	11
Рис. 1.2. Импульсы напряженности реального электрического поля на различных расстояниях r от центра контактного взрыва (мощность взрыва 0,5 Мт, проводимость грунта 10^{-3} См/м).....	12
Рис. 1.3. Импульс напряженности магнитного поля на различных расстояниях r от центра контактного взрыва (мощность взрыва 0,5 Мт, проводимость грунта 10^{-3} См/м)	13
Рис. 1.4. Импульсы напряженности вертикальной составляющей электрического поля в воздухе на различных расстояниях r от центра контактного взрыва (мощность взрыва 0,5 Мт, проводимость грунта 10^{-3} См/м).....	13
Рис. 1.5. ЭМИ высотного ядерного взрыва на ранней стадии (электрическая составляющая): (а) 0 – 10 нс (характеристика нарастания импульса), (б) 0 – 50 нс (характеристика спада импульса)	18
Рис. 1.6. Модуль спектральной плотности электрического поля высотного ЭМИ: 1 – для раннего ЭМИ, 2 – для промежуточного ЭМИ, 3 – для позднего ЭМИ (каждая составляющая показана пунктиром, а обобщенный импульс – сплошной линией).....	21
Рис. 1.7. Частотная зависимость нормализованного совокупного потока энергии от частоты	22
Рис. 1.8. Падающая, преломлённая и отражённая волны.....	24
Рис. 1.9. Расчетные значения горизонтального электрического поля при горизонтальной поляризации как суммы падающих и отраженных полей для ЭМИ высотного ЯВ (ранний ЭМИ): а – для различных высот h над поверхностью с хорошей проводимостью, б – для различных проводимостей $\sigma_{\text{гnd}}$ почвы.....	25
Рис. 1.10. Рассчитанное горизонтальное электрическое поле при вертикальной поляризации как суммы падающих и отраженных полей для ЭМИ высотного ЯВ (ранний ЭМИ) для различных углов подъема	25
Рис. 1.11. Расчетные значения прошедшего горизонтального электрического поля для ЭМИ высотного ЯВ (ранний ЭМИ): а – при различной проводимости почвы, б – при различном заглублении в почву	26
Рис. 1.12. Отдельные стадии развития обратного разряда и соответствующие им изменение во времени тока молнии: 1 – начало лидерной стадии; 2 – последняя стадия лидерного разряда; 3 – стадия интенсивной ионизации вблизи поверхности земли; 4 – промежуточная стадия обратного разряда; 5 – заключительная стадия обратного разряда	28
Рис. 1.13. К определению амплитудно-временных характеристик импульса тока молнии	29
Рис. 1.14. Форма импульса тока молнии при разряде с облака на землю	31
Рис. 1.15. Вероятностные характеристики параметров токов молнии: а) - для максимального тока; б) - для крутизны; в) - для удельной энергии; г) - для заряда; 1– 1-й импульс отрицательной молнии; 2- 2-й импульс отрицательной молнии; 3- импульс положительной молнии; 4- суммарный заряд, переносимый током отрицательной молнии; 5- суммарный заряд, переносимый током положительной молнии; $p, \%$ – вероятность того, что значение параметра не менее приведенного.	36
Рис. 1.16. Осциллограммы di/dt (а) и $i(t)$ (б) для токов молнии	37
Рис. 1.17. Статистические данные по длительности фронта импульса молнии: 1 – первые импульсы отрицательных молний; 2 – вторые импульсы отрицательных молний; 3 - импульсы положительных молний.....	37
Рис. 1.18. Обобщенные данные по параметрам молнии: 1 – максимальный ток; 2 – заряд; 3 – крутизна тока; 4 – удельная энергия.....	38

Рис. 1.19. Статистические данные об амплитудах и длительностях постоянной составляющей: 1 – длительность T_P пауз между импульсами тока отрицательных молний; 2 – общая длительность T_T тока молнии; 3 – амплитуда I_c постоянной составляющей тока.....	39
Рис. 1.20. Сверхширокополосный импульс в виде полупериода синусоиды: а – форма импульса, б – спектр импульса.....	46
Рис. 1.21. Сверхширокополосный импульс в виде синусоиды: а – форма импульса, б – спектр импульса	47
Рис. 1.22. Сверхширокополосный двухэкспоненциальный импульс: а – форма импульса, б – спектр импульса	48
Рис. 1.23. Сверхширокополосный гауссовский импульс: а – форма импульса, б – спектр импульса	49
Рис. 1.24. Различные типы электромагнитной обстановки: 1 – узкополосные сигналы в диапазоне от 0,2 до 5 ГГц, 2 – значение спектральных компонентов зависит от направления.....	50
Рис. 1.25. Кратковременный переменный по амплитуде электромагнитный импульс тока при ЭСР	54
Рис. 1.26. Схема для расчета наведенной эдс	55
Рис. 1.27. Роль внешних цепей в распространении помех от электростатических разрядов: 1 - поле, излучаемое вблизи разряда, охватывает кабели и наводит в них токи; 2 - часть разрядного тока замыкается на землю через эти кабели, непосредственно создавая помехи при использовании неэкранированных кабелей или создавая их через переходное сопротивление в случае экранированных кабелей.....	57
Таблица 1.1. Характеристики воздействия молнии на объекты	32
Таблица 1.2. Параметры электромагнитных полей молнии	32
Таблица 1.3. Типовые измеренные формы токов реальных молний	33
Таблица 1.4. Максимальные значения параметров тока молнии.....	40
Таблица 1.5. Характеристики генераторов и параметры микроволнового излучения.....	53