

Научно-методическое и программное обеспечение расчётной оценки стойкости РЭС к воздействию мощных сверхширокополосных электромагнитных излучений

Д.В. Лазарев

АО «Центральный научно-исследовательский институт «Курс»
г. Москва, ул. Кирпичная д.34а, qsk@mail.ru

В докладе представлены основные этапы методики расчётной оценки электромагнитной стойкости морских средств радиолокации, навигации и связи к воздействию сверхширокополосных электромагнитных полей высокой интенсивности. Приводится описание специализированного программного обеспечения, реализующее автоматизацию разработанной методики. Даны примеры проведённых оценок стойкости для современных морских радиоэлектронных средств различного назначения.

In the report the main stages of a technique of an estimated assessment of electromagnetic stability of sea means of radiolocation, navigation and communication to influence of ultrabroadband electromagnetic fields of high intensity are provided. The description of the specialized software realizing automation of the developed technique is provided. Examples of the carried-out firmness estimates for the modern sea radio-electronic means of different function.

Проблема обеспечения стойкости радиотехнических систем различного назначения (радиолокация, навигация, связь) к преднамеренным мощным электромагнитным воздействиям (МЭМВ) актуальна для всех современных радиоэлектронных комплексов гражданского и специального назначения. Острая необходимость обеспечения радиоэлектронной защиты (РЭЗ) современных многофункциональных радиоэлектронных комплексов обусловлена высокой степенью интеграции основных видов базовых несущих конструкций радиоэлектронного оборудования, начиная от шкафов и стоек до блоков и функциональных узлов, вплоть до компонентного уровня электронной элементной базы. При этом существенно увеличивается подверженность к различным видам отказов таких систем при влиянии мощного внешнего электромагнитного воздействия, в том числе искусственного происхождения. Функционирование разрабатываемых радиоэлектронных систем в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО) становится более традиционным условием их эксплуатации, особенно это характерно для подвижных объектов и сложных наземных инфраструктурных объектов. Тенденция к ужесточению эксплуатационной ЭМО, а также возможная вероятность преднамеренных МЭМВ приводит к выдвиганию повышенных требований к РЭЗ и анализу стойкости, в первую очередь, особо ответственных стратегических радиотехнических объектов специального назначения [1, 2].

Преднамеренные МЭМВ являются дальнейшим развитием методов радиоэлектронного противодействия (РЭП) и ведения радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и относятся в первую очередь к классу методов функционального подавления (ФП). Такие электромагнитные воздействия с точки зрения временных характеристик являются электромагнитными возмущениями в виде сверхкоротких импульсов (СКИ) с фронтами сигналов порядка десятков-сотен пикосекунд, длительностью порядка единиц-десятков наносекунд и частотой следования до единиц мегагерц. С точки зрения частотных характеристик такие воздействия являются сверхширокополосными сигналами (СШП), занимающими полосы радиочастотного спектра до единиц-десятков гигагерц. Данный класс сигналов является наиболее сложным как для теоретического

изучения и исследований, так и для практических реализаций и интерпретации результатов испытаний.

Основными потенциальными объектами мощных электромагнитных воздействий (high-altitude electromagnetic pulse - HEMP), определяющими основные аспекты обеспечения электромагнитной безопасности являются четыре класса объектов (рисунок 1): радиоэлектронное оборудование различного назначения, работающее в любом сегменте радиочастотного спектра (hazards of electromagnetic radiation to equipment - HERE); легковоспламеняющиеся жидкости и газы, имеющие низкие значения температур вспышки (hazards electromagnetic radiation to fuel - HERF); взрывчатые вещества, инициируемые электрическим зарядом (hazards electromagnetic radiation to ordnance - HERO); личный состав, персонал, экипаж и другие биологические объекты (hazards electromagnetic radiation to personnel - HERP). Все перечисленные объекты, характеризуются своими особенностями, и требуют отдельного пристального рассмотрения [3, 4].



Рис. 1. Объекты воздействия мощных преднамеренных электромагнитных факторов и электромагнитные эффекты, возникающие при электромагнитном воздействии на радиоэлектронные средства

До настоящего времени основным средством подтверждения характеристик стойкости радиоэлектронного оборудования к воздействию как кондуктивных, так и излучаемых МЭМВ являлись результаты лабораторных, полигонных или натурных испытаний образцов техники. Помимо того, что такие виды исследований являются трудоёмкими, сложными и дорогостоящими, **проблема интерпретации** протоколов результатов таких испытаний является отдельной самостоятельной задачей, решение которой не всегда однозначно.

Необходимость более глубокого исследования процессов, происходящих при преднамеренных МЭМВ на радиоэлектронные средства, требует применения аналитических и численных методов их описания. Расчётная оценка стойкости (РОСт) позволяет на ранних этапах проектирования радиоэлектронных систем прогнозировать их предельно-допустимые уровни (ПДУ) по отношению к МЭМВ. Наличие таких оценок позволит на основных этапах жизненного цикла радиоэлектронного средства оценить **качество** проведения этапов проектирования, отладки и изготовления образцов продукции и принятых организационно-технических, конструктивно-технологических и структурно-схемотехнических решений, направленных на достижение заданного уровня радиоэлектронной защиты. Применение РОСт актуально не только для перспективных проектируемых радиоэлектронных средств, но и для поставляемых или эксплуатируемых серийных образцов.

Преднамеренные МЭМВ с точки зрения временных характеристик являются электромагнитными возмущениями в виде сверхкоротких импульсов (СКИ) с фронтами

сигналов порядка десятков-сотен пикосекунд, длительностью порядка единиц-десятков наносекунд и частотой следования до единиц мегагерц. С точки зрения частотных характеристик такие воздействия являются сверхширокополосными сигналами (СШП), занимающими полосы радиочастотного спектра до единиц-десятков гигагерц. Данный класс сигналов является наиболее сложным как для теоретического изучения и исследований, так и для практических реализаций и интерпретации результатов испытаний. Упрощённая форма такого МЭМВ и возможные параметры описания подобных сигналов приведены на рисунке 2. При этом сигналы могут быть как униполярными, так и биполярными, одиночными или периодическими.

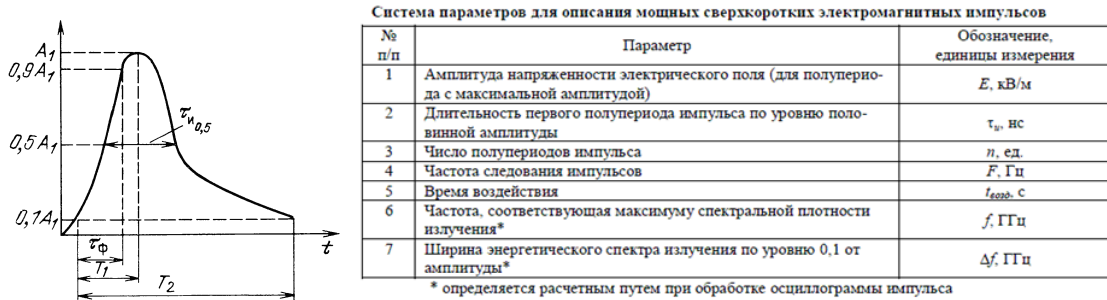


Рис. 2. Упрощённая форма электромагнитного импульса и перечень возможных параметров для его описания

Непосредственное влияние МЭМВ на радиоэлектронные средства различного назначения может привести к трём основным качественным эффектам: при воздействии источника МЭМВ на расстояниях порядка **тысяч метров** от рецептора воздействия происходит **информационное подавление**, проявляющееся в интенсивном воздействии электромагнитных радиопомех, приводящих к полной потере полезного сигнала на время действия электромагнитного возмущения; при воздействии источника МЭМВ на расстояниях порядка **сотен метров** от рецептора воздействия происходит **функциональное подавление**, проявляющееся в полной или частичной потере работоспособности радиоэлектронного оборудования, которая сохраняется не только на время действия электромагнитного возмущения, но и после него, вследствие чего для восстановления работоспособности радиотехнической системы требуется вмешательство оператора; при воздействии источника МЭМВ на расстояниях порядка **десятков метров** от рецептора воздействия происходит **физическое подавление**, проявляющееся в физическом разрушении радиотехнических цепей и электрорадиоэлементов оборудования, приводящее к полному выходу из строя отдельных трактов радиотехнической системы, для восстановления работоспособности которой требуется замена функциональных узлов.

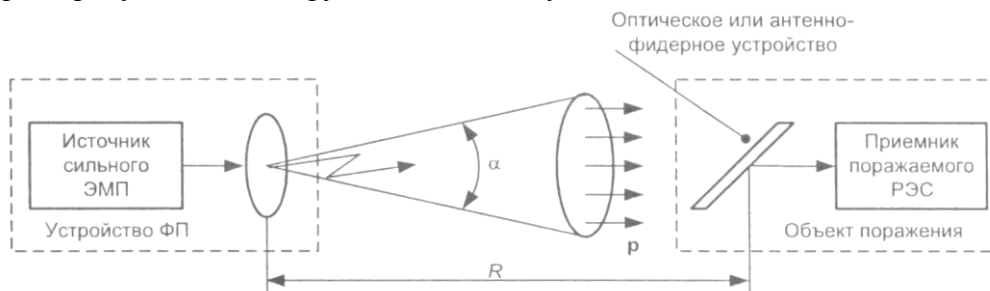


Рис. 3. Схема распространения излучаемых МЭМВ от источника к рецептору через антенно-фидерный тракт

Рассматривая влияние излучаемых МЭМВ на радиотехнические системы различного назначения необходимо в первую очередь рассматривать такое влияние через антенно-фидерные тракты таких систем, как наиболее уязвимых к данному виду воздействий (рисунок 3).

Разработанная технология расчётно-оценочной экспертизы (РОЭ) стойкости радиотехнических систем различного назначения представляет собой поэтапный анализ различных уровней (контуров) рассматриваемого процесса воздействия мощного электромагнитного фактора:

1. **Сигнальный контур** – анализ во временной области электромагнитного возмущения (мгновенной мощности), выдаваемого источником электромагнитного воздействия, с оценкой его параметров (форма, длительность, частота следования, длительность фронта, длительность среза, пиковое значение, время воздействия);

2. **Частотный контур** – анализ в частотной области электромагнитного возмущения, выдаваемого источником электромагнитного воздействия, с применением прямого быстрого преобразования Фурье (БПФ) для получения амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) зависимости спектральной плотности мощности сигнала;

3. **Фидерный контур источника** – анализ параметров фидерного устройства (в том числе составного) источника электромагнитного воздействия с оценкой его АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования транслируемого электромагнитного возмущения;

4. **Антенный контур источника** – анализ параметров антенного устройства источника электромагнитного воздействия с оценкой его АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования излучаемого электромагнитного возмущения;

5. **Траекторный контур** – анализ параметров трассы распространения электромагнитного возмущения с оценкой её АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования излучаемого электромагнитного возмущения;

6. **Антенный контур рецептора** – анализ параметров антенного устройства рецептора электромагнитного воздействия с оценкой его АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования наводимого электромагнитного возмущения;

7. **Фидерный контур рецептора** – анализ параметров фидерного устройства (в том числе составного) рецептора электромагнитного воздействия с оценкой его АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования транслируемого электромагнитного возмущения;

8. **Защитный контур** – анализ параметров схемотехнических защитных устройств от мощных электромагнитных воздействий с оценкой его АЧХ, ФЧХ и переходной характеристики (ПХ) коэффициента передачи и преобразования транслируемого электромагнитного возмущения;

9. **Компонентный контур** – анализ параметров входных цепей и компонентов рецептора с оценкой их предельно-допустимых уровней (ПДУ) стойкости к мощным электромагнитным воздействиям (анализ во временной области электромагнитного возмущения, дошедшего до входных цепей и компонентов рецептора, с применением обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ)).

Для каждого описанного уровня анализа рассматриваемого процесса воздействия мощного электромагнитного фактора разработано численно-аналитическое методическое обеспечение, позволяющее проводить оценку применительно к морским радиотехническим системам различного назначения, функционирующим в различных диапазонах радиочастотного спектра. При рассмотрении излучаемых МЭМВ на радиотехнические системы различного назначения необходимо, в первую очередь, рассмотреть такие воздействия через их антенно-фидерные тракты, которые являются

наиболее вероятными рецепторами и наиболее уязвимыми к данному виду воздействий.

По разработанной технологии и научно-методическому обеспечению было разработано специализированное исследовательское программное обеспечение (СИПО) (рисунок 4, 5).

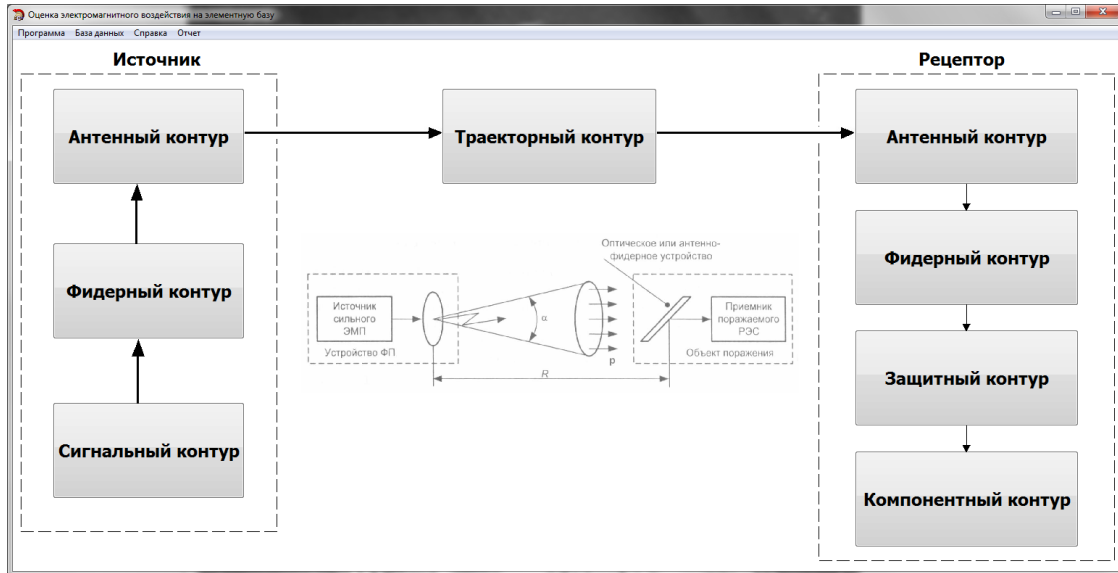


Рис. 4. Внешний вид главной формы разработанного СИПО

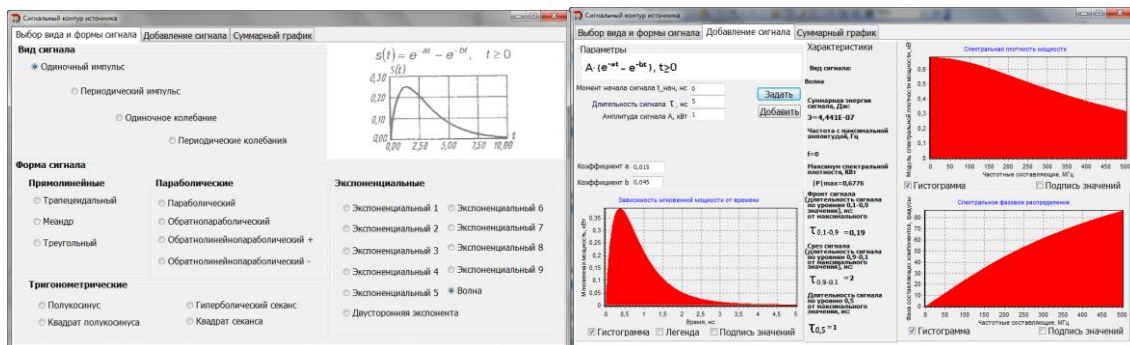


Рис. 5. Внешний вид формы сигнального контура разработанного СИПО

Разработанная технология расчётно-оценочной экспертизы (РОЭ) стойкости радиотехнических систем различного назначения представляет собой поэтапный анализ различных уровней (контуров) рассматриваемого процесса воздействия излучаемого мощного электромагнитного фактора. Для получения достоверных результатов расчёта необходимо, помимо прочего, наличие детальных исходных данных по всем учитываемым компонентам исследуемого радиоэлектронного средства. При этом из-за необходимости получения таких данных для сверхширокой полосы радиочастот, обусловленной сверхширокополосностью МЭМВ, целесообразно применять системы автоматизированного проектирования (САПР) для электродинамического моделирования и расчёта необходимых характеристик. Преимуществом применения для этих целей САПР является также возможность снижения трудоёмкости получения многочисленных исходных характеристик, возможность расчёта сложных компонентов исследуемого радиоэлектронного средства с учётом их разнообразных геометрических и физических параметров, возможность трансляции полученных численных массивов в пользовательские прикладные программы.

В РОЭ стойкости радиоэлектронной системы учитываются, в том числе, её фидерные и антенные контура. При этом для фидерного контура необходимо получение амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных (ФЧХ) характеристик его коэффициента передачи. Для этого необходим расчёт его S-параметров, коэффициента затухания, фазового коэффициента. Для антенного контура также необходимо получение АЧХ и ФЧХ его коэффициента передачи. Для этого необходим расчёт вещественной и мнимой составляющей входного сопротивления антенного устройства, вещественной и мнимой составляющей сопротивления излучения антенного устройства, трёхмерной диаграммы направленности и коэффициента усиления антенного устройства.

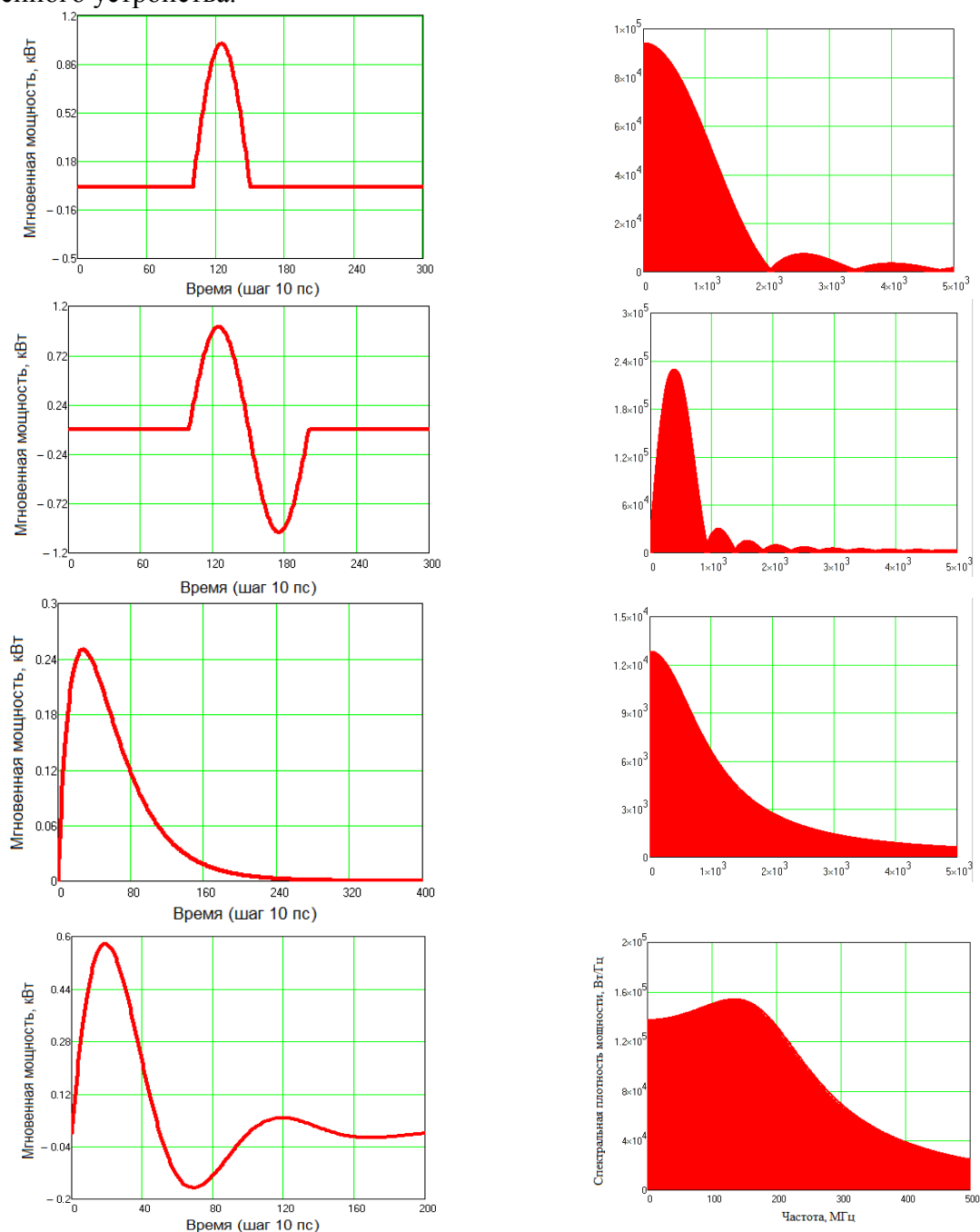


Рис. 6. Виды исследуемых воздействующих сверхкоротких электромагнитных импульсов (энергетико-временная и амплитудно-частотные характеристики)

Среди проводимых исследований основное внимание уделялось четырём видам сверхкоротких электромагнитных возмущений в виде униполярных и биполярных импульсов (полупериод синуса, один полный период синуса, двухэкспоненциальный, синус, затухающий по экспоненте), излучаемых четырьмя видами рупорных антенн (пирамидальный, Е-секториальный, Н-секториальный, конический) (рисунок 6).

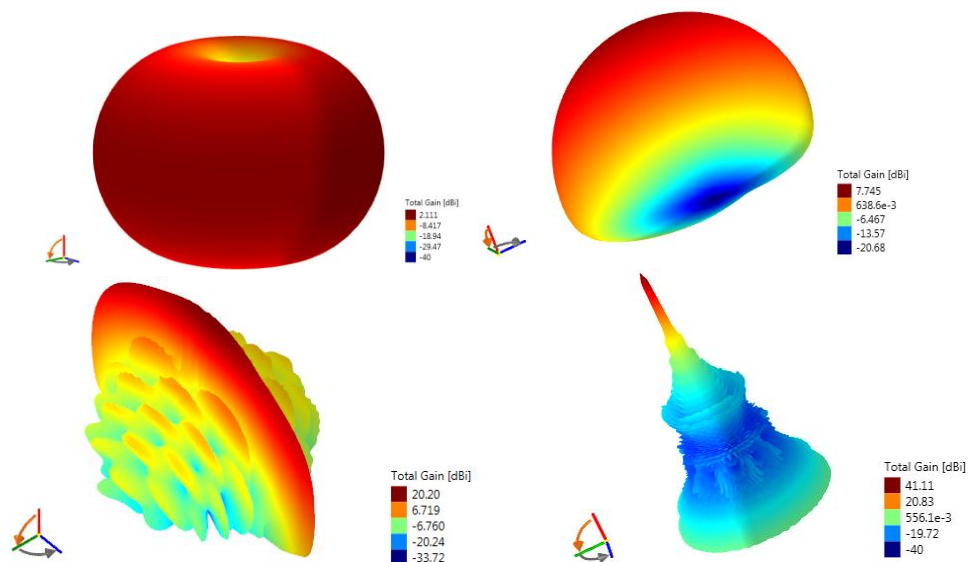


Рис. 7. Внешний вид диаграмм направленности четырёх видов антенных устройств корабельных радиоэлектронных средств: радиосвязной приёмопередатчик ОВЧ, GPS-приёмник, навигационная РЛС, приёмопередатчик спутниковой радиосвязи

Основными объектами воздействий сверхкоротких электромагнитных излучений являлись антенные устройства четырех видов корабельных радиоэлектронных средств: радиосвязной приёмопередатчик ОВЧ (159 МГц) – вибраторная штыревая антенна, GPS-приёмник (1575.42 МГц) – микрополосковая антенна, навигационная РЛС (9.41 ГГц) – антенная решётка, приёмопередатчик космической радиосвязи (11.7 ГГц) – зеркальная параболическая антенна (рисунок 7).

Например, при исследовании стойкости относительно МЭМВ в виде синуса, затухающего по экспоненте (последний сигнал по рисунку 6), на приёмопередатчик спутниковой радиосвязи электромагнитное возмущение, воздействующее на входной полупроводниковый прибор приёмника, имеет вид, представленный на рисунке 8.

По итогам проведённых исследований был сделан ряд заключений. Наиболее опасным является биполярный сверхкороткий электромагнитный импульс наносекундного диапазона в виде затухающего по экспоненте синуса, излучаемый пирамидальной рупорной антенной. Наименее эффективным является униполярный сверхкороткий электромагнитный импульс наносекундного диапазона в виде полусинуса, излучаемого зеркальной параболической антенной. Наиболее стойким к МЭМВ из рассмотренных является приёмопередатчик радиосвязи ОВЧ диапазона с вибраторной антенной. Наименее стойким к МЭМИ из рассмотренных является приёмопередатчик спутниковой связи СВЧ диапазона с зеркальной параболической антенной. Одними из определяющих факторов электромагнитной стойкости являются коэффициент усиления антенных устройств и полоса пропускания приёмников.

Преимуществом предлагаемого подхода к расчётной оценке стойкости (РОСт) радиотехнических устройств к мощным преднамеренным электромагнитным воздействиям является возможность анализа влияния каждого контура на прохождение рассматриваемого электромагнитного процесса и оценка их вклада в амплитудно-фазо-

частотное преобразование структуры исследуемого электромагнитного возмущения. Преимуществом предлагаемого подхода к получению базы данных расчётных ПДУ относительно излучаемых МЭМВ для исследуемых радиоэлектронных систем является возможность получения ряда таких оценок при вариации многочисленных видов и сочетаний исходных данных, относящихся как к МЭМВ (длительность фронта, пиковое значение, частота следования), так и к исследуемой радиоэлектронной системе (параметры фидерного тракта, характеристики антенного устройства).

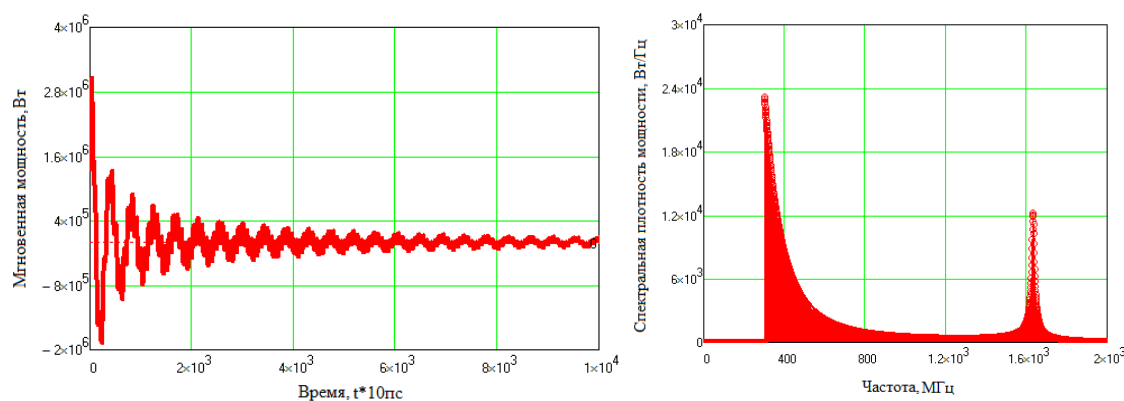


Рис. 8. Энергетико-временная и амплитудно-частотные характеристики электромагнитное возмущение, воздействующее на входной полупроводниковый прибор приёмопередатчик спутниковой радиосвязи

Практическая значимость разрабатываемой технологии и методического обеспечения каждого её этапа заключается в возможности на ранних этапах проектирования радиоэлектронных средств на основе расчётно-оценочной экспертизы их стойкости к потенциальным мощным преднамеренным электромагнитным воздействиям обосновать организационно-технические, конструктивно-технологические и структурно-схемотехнические решения, направленные на достижение заданного уровня радиоэлектронной защиты, а также существенно улучшить разработку программы и методик лабораторных, полигонных и натуральных испытаний на этапе контрольно-инструментальной экспертизы (КИЭ) стойкости радиоэлектронных устройств к мощным преднамеренным электромагнитным воздействиям и интерпретации протоколов таких испытаний.

Литература

1. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / Под ред. Газизова Т.Р. - Томск, Томский государственный университет, 2002. — 204 с.
2. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. - М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. - 478 с.
3. ГОСТ Р 51317.1.5-2009 Совместимость технических средств электромагнитная. Воздействия электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения. Основные положения.
4. ГОСТ Р 52863-2007 Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования.