

# Испытательная система для тестирования устойчивости к излучаемым помехам

А. Смирнов, д. т. н.<sup>1</sup>, К. Басалаев<sup>2</sup>, Ю. Занин<sup>3</sup>

УДК 621.317 | ВАК 05.11.01

Актуальность электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС) различного назначения постоянно возрастает в связи с активным расширением используемых диапазонов частот и перечня решаемых функциональных задач, связанных не только с повышением комфорта и безопасности повседневной жизни, но и с обеспечением надежности ТС. Оценка характеристик ЭМС применительно к общепромышленной продукции является обязательной процедурой подтверждения соответствия с техническим регламентом ТР ТС № 20 «Электромагнитная совместимость технических средств».

Для других продуктов обязательность выполнения требований ЭМС отражена в технических заданиях на их разработку. В компании «Диполь» разработали новую систему, позволяющую выполнять тестирование различных устройств на устойчивость к излучаемым помехам.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА

Тестирование технических средств на ЭМС включает четыре группы испытаний. Эти группы предполагают испытания на эмиссию и устойчивость относительно кондуктивных и излучаемых помех. Иногда в отдельную группу выделяют тестирование устойчивости и эмиссии относительно качества сети питания. Независимо от видов испытываемых ТС, тестирование которых регламентируется соответствующими стандартами по нормам и методам испытаний, каждая группа стандартов в той или иной степени содержит все четыре типа испытаний. Объяснимо, что испытательные лаборатории желали бы иметь в своем составе весь комплекс испытательного оборудования и средств измерений. В то же время, понимая разную стоимость технического оснащения под различные группы испытаний, организаторы лабораторий обычно начинают с наиболее бюджетной части, относящейся к кондуктивным помехам.

Инструментальное обеспечение испытаний ЭМС, касающихся излучаемых помех, чрезвычайно затратно материально. Особенно это относится к тестированию устойчивости ТС к излучаемым помехам. Поэтому при формировании требований к характеристикам воспроизводимых полей заказчики исходят из двух критериев:

- охвата требований наибольшего количества стандартов по нормам и методам испытаний для выбранного частотного диапазона;
- возможности в перспективе рационально наращивать оснащенность лаборатории относительно частотного диапазона испытаний.

Традиционная схема испытательной установки обычно включает цепь «генератор – усилитель мощности – антенна». Но в последнее время активно развиваются альтернативные схемы испытательных систем. Такие схемы, основанные, в частности, на ГТЕМ-камерах или реверберационных камерах, обеспечивают минимизацию финансовых затрат при решении задач тестирования малогабаритных объектов с максимальным объемом до 1 м<sup>3</sup>. Для универсальных испытательных установок, не имеющих ограничений по габаритным размерам объектов испытаний, традиционная схема является предпочтительной.

При создании традиционной схемы испытательной установки первичным критерием формирования перечня оборудования является выбор частотного диапазона испытаний (с учетом перспективы усложнения задач желательно закладывать максимально широкий диапазон) и уже потом – уровня создаваемых воздействий. В определенной степени это обусловлено тем фактом, что, по мнению заказчика, недостающие уровни воздействий могут быть легко достигнуты уменьшением расстояния до объекта испытаний или подбором соответствующей излучающей антенны. При этом необходимое расширение частотного диапазона установки может быть обеспечено внедрением такого дополнительного оборудования, как антенны или усилители мощности для новых

<sup>1</sup> АО «НПФ «Диполь», руководитель направления ЭМС и радиоизмерений, smirnov@dipaul.ru.

<sup>2</sup> АО «НПФ «Диполь», технический специалист направления ЭМС и радиоизмерений, bk@dipaul.ru.

<sup>3</sup> АО «НПФ «Диполь», специалист отдела проектов, ZaninJuM@dipaul.ru.

частотных диапазонов. В итоге изначально приобретает широкополосный генератор, а затем, по мере расширения оснащённости, докупаются антенны и усилители мощности.

В табл. 1 сведены требования основных стандартов по уровням создаваемых электромагнитных полей [1–4]. Из анализа табл. 1 видно, что при подборе элементов испытательной установки показатели жесткости испытаний не всегда являются достаточными для выбора аппаратуры, в частности усилителя мощности и излучающих антенн. В общем случае необходимо принимать во внимание вид модуляции воздействия и требования к характеру и допустимым значениям вариации поля, чтобы учитывать именно максимальное (экстремальное) значение создаваемого поля.

В то же время можно констатировать, что обеспечение испытаний в диапазоне 100 МГц – 18 ГГц с уровнями воздействия 200 В/м закрывает практически весь объем испытаний, исключая диапазон частот 18–40 ГГц.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Задача по созданию испытательной системы тестирования устойчивости к сильным электромагнитным полям (причем включая и диапазон 18–40 ГГц) была поставлена одним из заказчиков компании «Диполь». Основной акцент делался на выполнении требований по тестированию авиационной продукции [2]. Требования данного задания приведены в табл. 2.

Особенностями задачи являлись следующие условия:

- традиционная конфигурация испытательной системы: «генератор – усилитель – антенна»;
- требуемые жесткости испытаний необходимо было обеспечивать на удалении 3 м;
- требования к однородности поля отсутствовали;
- не было ограничений на минимальное количество позиций испытательной системы, обеспечивающее последовательное облучение заданного крупногабаритного объекта;

**Таблица 1.** Требования к испытаниям для различных стандартов

Объекты, нормативный документ	Частоты и жесткость испытаний	Модуляция поля (АМ – амплитудная, ИМ – импульсная)	Вариации поля, дБ	Коэффициент увеличения напряженности поля при тестировании	Тестовое расстояние, м
Промышленная продукция, ГОСТ ИЕС 61000-4-3	0,08–6 ГГц, до 30 В/м (имеется X-категория)	АМ: синус (1 кГц, 80%) и меандр (200 Гц, 100%); ИМ: 0,6 мс / 5 мс и 0,4 мс / 10 мс, с прерываниями 1 Гц	0...+6	3,6 – для АМ; 2 – для ИМ	≥1, предпочтительно 3
Автотранспорт, автоэлектроника, Правила ЕЭК ООН № 10	0,02–2 ГГц, до 30 В/м	АМ: синус (1 кГц, 80%) – для частот <0,8 ГГц; ИМ: 0,6 мс / 4,6 мс – для частот ≥0,8 ГГц	Поле нормируется только в единственной опорной точке	1	2
Авионика, Квалификационные требования RTCA DO-160	Для АМ: 0,1–18 ГГц, до 490 В/м; для ИМ: 0,4–18 ГГц, до 7200 В/м	АМ: синус (1 кГц, <90%) и меандр (1 кГц, <90%); ИМ: 0,001 мс / 1 мс или 0,004 мс / 1 мс (в зависимости от частоты) с прерываниями 1–3 Гц – только для ≥ 0,4 ГГц	0... –3	1	≤1 или в дальней зоне
Бортовая авионика, ГОСТ РВ 6601-001	0,002–18 ГГц, до 200 В/м	АМ: меандр 1 кГц	0... –3	1	1
Оборонная отрасль, MIL-STD-461	0,002–40 ГГц, до 200 В/м	АМ: меандр 1 кГц	0... –3 (только для частот >0,2 ГГц)	1	1

**Таблица 2.** Требования технического задания

Диапазон частот	Напряженность поля, В/м	Измерительное расстояние, м
100-400 МГц	150	3
400-700 МГц	50	
700 МГц - 1 ГГц	100	
1-2 ГГц	200	
2-4 ГГц	200	
4-6 ГГц	200	
6-8 ГГц	200	
8-12 ГГц	300	
12-18 ГГц	200	
18-40 ГГц	150	

- оптимальные количество и спецификации усилителей – то есть заказчик должен был иметь возможность использовать в конкретном случае только тот набор усилителей (для соответствующих частотных диапазонов), который соответствует данной задаче испытаний.

Поскольку конфигурация испытательной установки была определена как традиционная, то основное внимание уделялось выбору элементов этой системы, в первую очередь, усилителей мощности и излучающих антенн.

Наиболее важной задачей явился подбор усилителей мощности. Общим выражением, связывающим мощность и создаваемое электромагнитное поле, является оценочная формула следующего вида:

$$E = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{30PG}$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $R$  – расстояние от антенны,  $P$  – подводимая мощность,  $G$  – коэффициент усиления антенны.

Данное выражение позволяет оценить минимально необходимую излучаемую мощность, обеспечивающую требуемую напряженность поля. Оценочное значение является необходимым ориентиром при выборе усилителя мощности. При этом важными являются следующие обстоятельства:

- данное значение выходной мощности должно соответствовать линейному режиму работы усилителей. Часто в спецификациях и названиях моделей производители указывают максимальную мощность, в том числе и в режиме насыщения;

- характерные границы частотного диапазона выбирались, исходя из требований к частотным диапазонам испытаний, определяемым различными стандартами. Это обеспечивает рациональную эксплуатацию установки в случае ограниченного применения по частоте. В итоге рассматривались усилители мощности с верхними частотами из ряда 1, 3, 6, 18, 26, 40 ГГц или схожих значений;
- усилители мощности должны иметь встроенные каналы отвода падающей и отраженной мощности и возможность индикации уровней этих мощностей. Это позволяет проводить калибровку системы без использования внешних дополнительных двухсторонних направленных ответвителей, вносящих дополнительное ослабление;
- усилители мощности должны иметь защиту от высокого КСВН по выходу с возможностью сохранения режима усиления сигнала. Это связано с возможностью попадания отраженного от объекта сигнала на выходные разъемы усилителей, что небезопасно для их работы. Большинство современных усилителей имеет встроенную защиту от большого КСВН на выходе, но часто это всего лишь предохранительный режим с переводом усилителя в «режим ожидания».

При выборе излучающих антенн основными критериями были частотный диапазон, коэффициент усиления, допустимая входная мощность, значения КСВН.

Основные проблемы при создании сильного электромагнитного поля связаны с частотным диапазоном до 100 МГц. Для обеспечения запаса по энергетике для этого частотного диапазона были выбраны так называемые сложенные антенны, фактически представляющие решетку из двух компланарных антенн. В то же время для диапазона частот выше 18 ГГц были выбраны различные комплекты рупорных антенн. Поскольку в этом частотном диапазоне направленные свойства антенн проявляются существенно, то различные типы облучающих антенн позволяют пользователю оптимизировать конфигурацию системы за счет выбора антенн, обеспечивающих минимизацию времени тестирования при последовательном облучении.

В итоге перечень основных элементов системы (рис. 1) составили средства измерений и оборудование, приведенные в табл. 3.

Используемые усилители мощности отличает существенная физическая масса. Для удобства эксплуатации усилители мощности вместе с локальными коммутаторами были размещены в мобильных стойках (рис. 2). Отдельная стойка содержала общие для всех устройств генератор сигналов и коммутатор. Поскольку усилители мощности имеют достаточно высокое усиление (порядка 50 дБ), то такая компоновка позволила размещать генераторную



Рис. 1. Общий вид предложенной системы



Рис. 2. Одна из стоек системы

стойку далеко от рабочих усилителей мощности. При этом излучающие антенны были размещены в непосредственной близости от соответствующих по частотному диапазону усилителей мощности. В результате пользователю

системы достаточно было перемещать только необходимую для работы стойку с усилителем мощности.

По завершении монтажа системы были проведены приемочные испытания. Их результаты показали

Таблица 3. Основные элементы созданной испытательной системы

Тип	Модель	Производитель
Генератор сигналов	E8267D	Keysight
Излучающие антенны	STLP 9128 D; наборы антенн (рупорных)	Schwarzbeck; ATM
Усилители мощности	SVC2000 (100–500 МГц, 2000 Вт); S2505-1000 (500–2500 МГц, 1000 Вт); CT825-500 (2,5–8 ГГц, 500 Вт); CT188-500 (8–18 ГГц, 500 Вт); T2618-100 (18–26 ГГц, 100 Вт); T4026-100 (26–40 ГГц, 100 Вт)	IFI
Пробник электрического поля	HI-6153 (10 МГц – 40 ГГц)	ETS-Lindgren
Коммутатор	RFB 6000, с опциями до 40 ГГц	TESEQ/ AMETEK
Мобильные стойки	6 шт., на колесах, с амортизирующей рамой, варианты применения: открытые /полуоткрытые /закрытые	AMETEK
Программное обеспечение	Compliance 5 (тестирование устойчивости в соответствии с различными стандартами)	TESEQ

рациональный выбор конфигурации системы и соответствие реальных характеристик создаваемых воздействий требованиям технического задания, причем с запасом по полю в 1,3–1,5 раз в различных частотных диапазонах. Учитывая то, что выбранные усилители являются моделями из серий с одинаковым частотным диапазоном, но разными выходными мощностями, подобная конфигурация может быть использована без изменений для создания испытательной системы с меньшими значениями создаваемых электромагнитных полей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ ИЕС 61000-4-3-2016 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4–3. Методы испытаний и измерений.
2. Испытание на устойчивость к излучаемому радиочастотному электромагнитному полю.
3. Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний.
4. Правила ЕЭК ООН N10 (пересмотр 5). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении электромагнитной совместимости.
5. MIL-STD-461G, Department of Defense interface standard: requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment (11.12.2015).

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена  
за две книги  
2400 руб.

# ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ ТРОЯНЫ – СПОСОБЫ ВНЕДРЕНИЯ И МЕТОДЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ. ПЕРВАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

В 2-х книгах

**Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В.**

**Под общей редакцией Белоуса А. И.**

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019.  
Кн. 1 – 688 с.; Кн. 2 – 630 с.,  
ISBN 978-5-94836-524-4

В двухтомнике исследован феномен программных и аппаратных троянов, которые фактически являются технологической платформой современного и перспективного кибероружия. В первой вводной главе показано, что развитие всех «обычных» и «новейших» видов вооружений дошло до такой стадии, что их использование на практике будет равносильно самоубийству начавшей войну стороны. Осознание этого факта привело к развитию информационно-технического оружия (кибероружия и нейрооружия). В последующих главах детально исследованы концепции, методы и примеры реализации этого вида оружия. Рассмотрены основные виды программных троянов, вирусов и шпионских программ, показан эволюционный путь развития аппаратных троянов от «ящичков» и «коробочек» до микросхем.

Книга ориентирована на специалистов по информационной безопасности, а также будет полезна всем интересующимся данной темой.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphere.ru](mailto:knigi@technosphere.ru), [sales@technosphere.ru](mailto:sales@technosphere.ru)

**НОВЫЕ  
ДАТЫ**

**25-26.08**

# SEMIEXPO RUSSIA

**SEMIEXPO Russia** объединяет международную специализированную выставку с двухдневной деловой программой, где ежегодно принимают участие руководители, эксперты, топ-менеджеры крупнейших компаний по микроэлектронике, представители органов государственной власти, научно-исследовательских институтов и международных ассоциаций.

## Программные мероприятия на SEMIEXPO Russia 2020

SEMI Member Forum 2020

Международный MEMS Forum

Новый этап конкурса  
«Инновационная радиоэлектроника»

Обзор карьерных возможностей  
и ежегодный День Талантов

Экспортные перспективы.  
Открытый диалог с зарубежными  
рынками

Экспозиция кластеров из Европы и  
Азии

**МОСКВА**

**ЭКСПОЦЕНТР**

**25 – 26 АВГУСТА 2020**

**ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО ТЕХНОЛОГИЯМ, МАТЕРИАЛАМ,  
СТАНДАРТАМ И ОБОРУДОВАНИЮ  
В ОБЛАСТИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Больше информации на официальном сайте

**[www.semiexpo.ru](http://www.semiexpo.ru)**

 **@semiexporussia**