

Методы испытаний кабельных жгутов на электромагнитную совместимость

Сергей ЛЮТАЕВ

Электромагнитная совместимость РЭА зачастую определяется экранирующими свойствами входящих в ее состав кабелей и кабельных сборок. В статье рассматриваются основные стандарты, определяющие методы испытаний по оценке эффективности экранирования кабелей и кабельных жгутов. Описанные методы могут быть использованы разработчиками для проведения отработочных, предварительных испытаний.

Лаборатория электромагнитной совместимости (ЭМС) АО «ТЕСТПРИБОР» проводит испытания различных изделий, в том числе и бортовой аппаратуры (БА) летательных аппаратов (ЛА). В ходе испытаний зачастую выявляются несоответствия изделий требованиям нормативных документов, причем часто это бывает из-за неправильно изготовленных кабельных жгутов.

Одна из причин заключается в том, что разработкой изделия, представляемого на испытания по ЭМС, и разработкой кабельных жгутов занимаются разные отделы одной организации, а то и разные организации, причем обычно разработчик кабельных жгутов не имеет представления о требованиях по ЭМС к изделию, системе и всему комплексу.

Рассмотрим некоторые из этих требований.

При испытаниях на эмиссию радиочастотных помех (ГОСТ В 25803-90, ГОСТ РВ 6601-002-2008, ГОСТ Р 51318.11-2006) производится измерение помех от испытуемого изделия в рабочем состоянии со всеми присоединенными кабелями питания, связи, управления, входящими в их состав соединителями как в линиях связи и питания, так и по радиочастотному (РЧ) полю.

При испытаниях на устойчивость к помехам воздействие также прилагается к кабельным жгутам, причем для некоторых видов помех воздействию подвергаются именно кабельные жгуты. В таблице 1 приведены примеры видов испытаний и уровней воздействия.

Очевидно, что при низких экранирующих свойствах кабелей прилагаемые воздействия могут нарушить работоспособность аппаратуры или привести к ее отказу.

Испытания БА ЛА на ЭМС достаточно сложные и дорогостоящие, поэтому целесообразно оценивать экранирующие жгуты отдельно, до их испытания в составе системы, или испытывать их на начальных стадиях.

Методы проведения испытаний бортовой кабельной сети ЛА с целью оценки эффективности экранирования приведены в ОСТ 101205-2012, разработанном головной организацией по стандартизации продукции авиационной промышленности Минпромторга РФ ФГУП «НИИСУ» с участием ОАО «НИИАО».

Стандарт устанавливает методики измерений эффективности экранирования оплетками элементов бортовой кабельной сети ЛА: одиночных проводов и жгутов проводов. Эти методики предназначены для измерения поверхностного переходного сопротивления и эффективности экранирования в диапазоне частот 0,1–1000 МГц.

Переходное сопротивление электрического короткого одиночного провода (обычно длиной 300 мм) измеряют по схеме, представленной на рис. 1.

Испытуемый провод подключают к выходу синхрогенератора анализатора спектра через переходное устройство с резистором 50 Ом, второй конец провода через высокочастотный коаксиальный соединитель подключают к выходу анализатора спектра [1].

Таблица 1. Примеры видов испытаний и уровней воздействия

Внешние воздействующие факторы	Нормативно-техническая документация	Способ воздействия	Уровень воздействия
Устойчивость к радиочастотным полям (HiRf)	КТ160D разд. 20	антенна-облучатель	$E_{HI} = 200-500 \text{ В/м};$ $\tau = 16-50 \text{ мкс}$
Магнитное поле	КТ160D разд. 19	провод-индуктор	$I = 30 \text{ А/м};$ $F = 380-400 \text{ Гц}$
Электрическое поле	КТ160D разд. 19	провод-индуктор	$E = 135-5400 \text{ В/м};$ $F = 380-15000 \text{ Гц}$
Импульсное воздействие	КТ160D разд. 19	провод-индуктор	$\tau_r = 600 \text{ В};$ $\tau_1 = 50-1000 \text{ мкс};$ $\tau_2 = 0,2-10 \text{ мкс}$
Затухающие синусоидальные импульсы	спецтребования	инжектор	$I \leq 5 \text{ А}$
МИП (микросекундные импульсные помехи)	ГОСТ Р 51317.4.5-99	инжектор/устройство связи	$V = 0,5-4 \text{ кВ}$
НИП (наносекундные импульсные помехи)	ГОСТ Р 51317.4.4-2007	инжектор (клещи связи)	$V = 0,2-4 \text{ кВ};$ $\tau = 1-1000 \text{ нс};$ $F_n = 5-100 \text{ кГц}$
ЭСР (электростатический разряд)	КТ160D разд. 25, спецтребования	генератор ЭСР, разрядник	$15-25 \text{ кВ}$

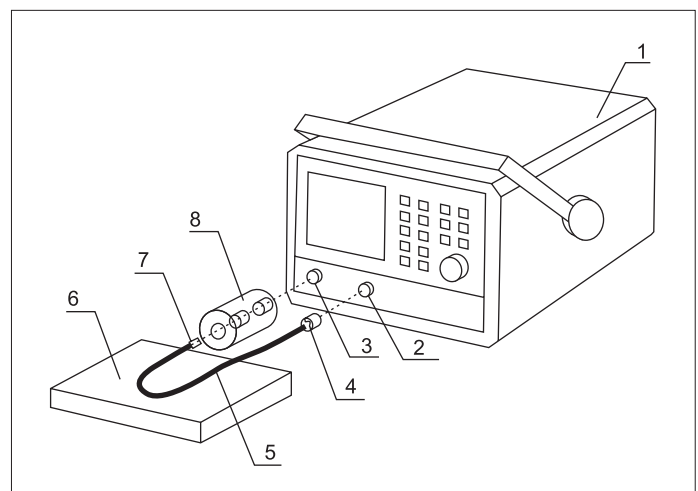


Рис. 1. Испытательная установка для измерения переходного сопротивления одиночного экранированного провода: 1 — анализатор спектра; 2 — измерительный вход; 3 — выход синхрогенератора; 4 — коаксиальный соединитель; 5 — испытуемый одиночный экранированный провод; 6 — диэлектрическая подставка; 7 — оплетка, соединенная с центральным проводником; 8 — переходное устройство с резистором 50 Ом и коаксиальным соединителем

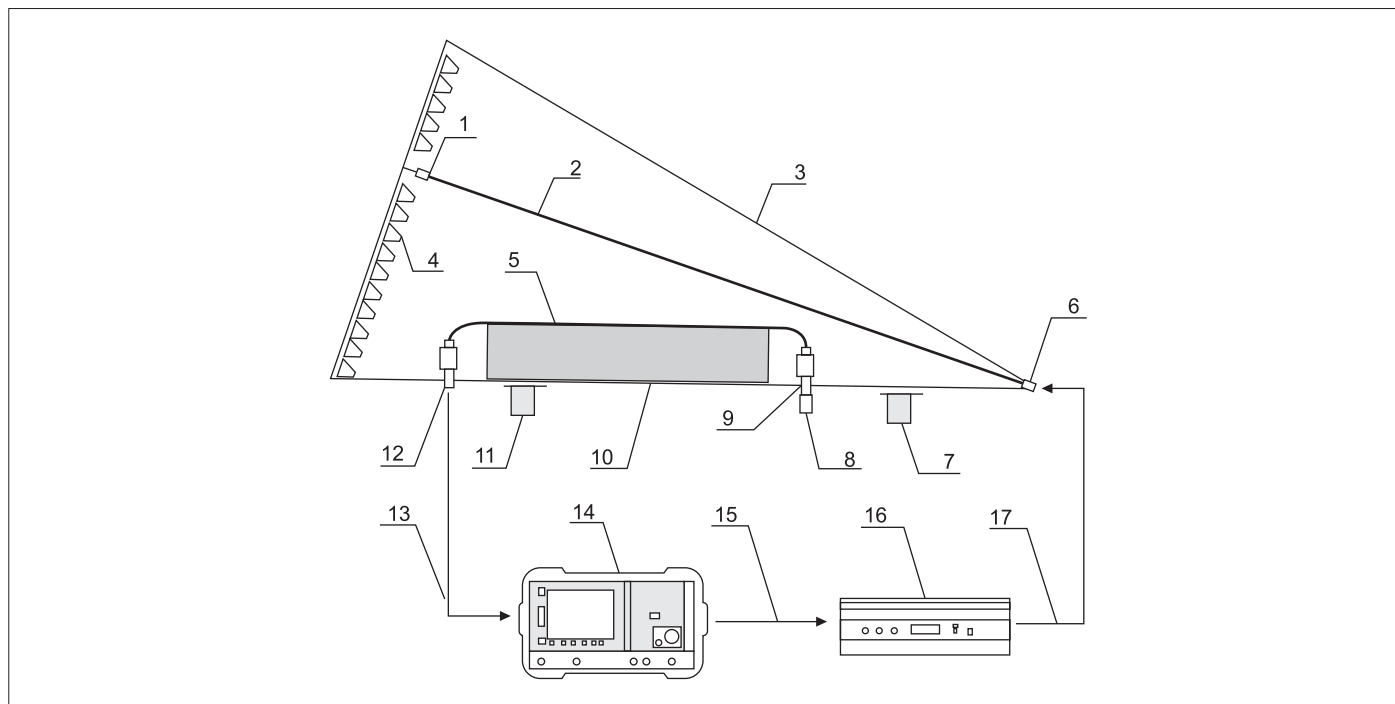


Рис. 2. Схема установки для измерения эффективности экранирования экранирующими оплетками проводов или жгутов в ГТЕМ-камере:

1, 8 — резисторы сопротивлением 50 Ом; 2 — центральная пластина; 3 — ГТЕМ-камера; 4 — радиопоглощающий материал; 5 — испытуемый кабель с оплеткой с двумя адаптерами на концах; 6, 9, 12 — высокочастотные коаксиальные соединители; 7, 11 — деревянная подставка; 10 — подставка из пенопласта; 13 — на вход анализатора спектра; 14 — анализатор спектра; 15 — выход синхрогенератора; 16 — усилитель; 17 — выход усилителя

Переходное поверхностное сопротивление в Ом/м рассчитывают по формуле:

$$Z_T = U_{\text{пров}} / (I_{\text{пров}} \cdot l) = (50 \cdot U_{\text{пров}}) / (U_{\text{вых}} \cdot l),$$

где: $U_{\text{пров}}$ — напряжение, наведенное на внутреннем проводнике одиночного экранированного провода, измеренное анализатором спектра, В; $I_{\text{пров}}$ — ток, протекающий по внешней поверхности оплетки испытуемого провода ($I_{\text{пров}} = U_{\text{вых}} / 50 \text{ Ом}$), А; $U_{\text{вых}}$ — напряжение на выходе синхронного генератора; l — длина испытуемого проводника, м.

Эффективность экранирования SE в децибелах рассчитывают по формуле:

$$SE = 34 - 20 \lg(Z_T).$$

К недостаткам данного метода можно отнести отсутствие серийно выпускаемой оснастки, плохую повторяемость результатов, частотную изрезанность измеренной характеристики.

Методика измерения эффективности экранирования оплетками проводов произвольной длины в диапазоне 30–1000 МГц основана на измерении напряжения в проводнике, помещенном в испытательную камеру ГТЕМ (гигагерцевая ТЕМ-камера) или РТЕМ (резонансная ТЕМ-камера), сначала с экраном (оплеткой), потом без него. Схема измерительной установки с использованием камеры ГТЕМ показана на рис. 2.

Эффективность экранирования в децибелах рассчитывают по формуле:

$$SE = 20 \lg(U_{\text{без экр}} / U_{\text{экр}}).$$

Для обеспечения устойчивой работы цифрового бортового оборудования в условиях воздействия электромагнитных полей излучения высокой интенсивности (HIRF) с напряженностью $E_{\text{норм}} = 100 \text{ В/м}$ в соответствии с [1] (раздел 20, категория жесткости W) эффективность экранирования оплетками одиночных проводов и жгутов проводов должна быть не менее значений, приведенных в таблице 2.

Если в техническом задании на оборудование задана другая напряженность поля $E_{\text{треб}}$, отличная от 100 В/м, то требуемую эффек-

тивность экранирования одиночного провода или жгута в децибелах рассчитывают по формуле:

$$SE_{\text{треб}} = SE_{\text{таб}} + 20 \lg(E_{\text{треб}}) - 40,$$

где $SE_{\text{таб}}$ — эффективность экранирования, заданная в таблице 2.

К достоинствам данного метода следует отнести достаточно точное моделирование поведения кабеля в радиочастотном поле. Недостатком является высокая стоимость и сложность оборудования, его громоздкость, необходимость защиты персонала от излучения.

В кабельной промышленности для оценки эффективности экранирования кабелей применяется метод триаксиальной линии (ГОСТ Р 54429-2011, ГОСТ Р 53880-2010) [2, 3]. В ОСТ 1 01205-2012 этот метод приводится как альтернативный [1]. Схема измерения по этому методу показана на рис. 3. Эффективность экранирования испытуемого образца в децибелах можно вычислить по формуле:

$$SE = 20 \lg(U_{\text{ген}} / U_{\text{вх}}),$$

где $U_{\text{ген}}$ — напряжение на выходе генератора; $U_{\text{вх}}$ — напряжение на входе анализатора спектра. Есть различие в терминологии и определениях, используемых специалистами связи [2, 3] и радиоэлектронике [1]. В данной статье при описании методов испытаний сохраняется терминология соответствующего первоисточника.

Удобство метода триаксиальной линии, компактность измерительных установок и относительная простота оборудования делают его привлекательным для испытателей. На рис. 4 приведено изображение установки с использованием оборудования фирмы BEDEA/

Таблица 2. Рекомендуемые значения эффективности экранирования оплетками одиночных проводов и жгутов проводов

Диапазон частот, МГц	Эффективность экранирования одиночного провода, дБ	Эффективность экранирования жгута проводов, дБ
30–100	40	
100–200	35	30
200–400	30	25
400–1000	20	

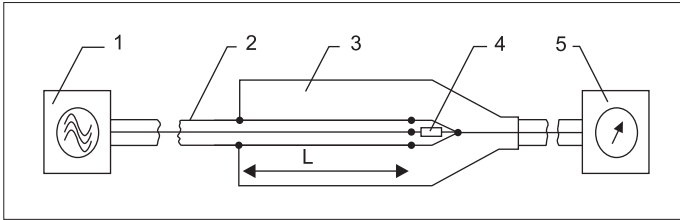


Рис. 3. Схема измерений с помощью триаксиальной линии:
1 — генератор; 2 — испытываемый кабель; 3 — измерительная труба;
4 — согласующий резистор; 5 — измерительный приемник

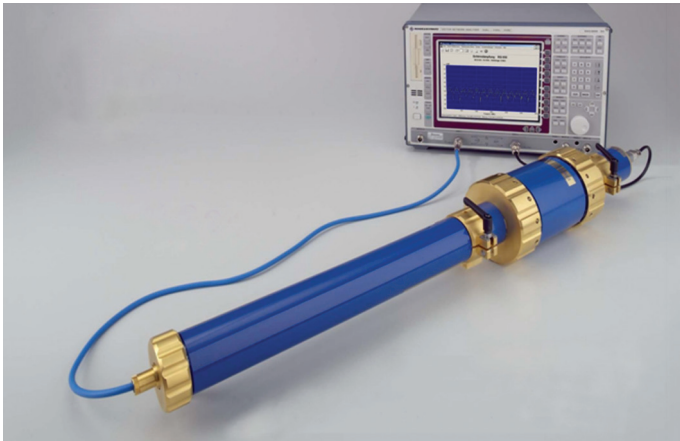


Рис. 4. Установка для измерения эффективности экранирования с помощью триаксиальной линии

Rosenberger [4]. На основе подхода, использующего триаксиальный метод, можно испытывать не только кабели, но и кабельные соединители и различные прокладки, в том числе предназначенные для обеспечения ЭМС. Для этого исследуемый соединитель помещается либо в трубу триаксиальной камеры, либо в резонансной камере на основе прямоугольного волновода. Схема установки для испытания соединителей показана на рис. 5. На рис. 6 показана установка для испытания различных прокладок. Преимуществом метода является защищенность установки от посторонних шумовых излучений и отсутствие собственных. Это обеспечивает динамический диапазон измерений до 100 дБ без использования специального экранированного помещения. Частотный диапазон измерений — от нескольких килогерц до 3–4 ГГц и выше.

Триаксиальный метод только в последние несколько лет утвердился в качестве предпочтительного в стандартах кабельной промышленности, до этого использовался метод «поглощающих клещей» (ГОСТ Р 54429-2011, п. 8.3.9, IEC 61196-1 п. 12.4). Схема измерений по этому методу представлена на рис. 7. Принцип измерений состоит в том, что сигнал от генератора подается в испытываемый кабель через отверстие в отражающей пластине, на другом конце кабеля включается согласующая нагрузка. За отражающей пластиной располагаются поглощающие ферритовые клещи с токосъемником, на расстоянии 6 м располагаются еще одни поглощающие клещи. Затухание экранирования в децибелах определяется по формуле:

$$SE = 10 \cdot \lg(P_1/P_{2max}),$$

где: P_1 — мощность, подаваемая от генератора; P_{2max} — максимальная излучаемая мощность.

При доступных в настоящее время поглощающих клещах затухание экранирования может быть измерено в диапазоне до 2,5 ГГц. К достоинству этого метода можно отнести то, что измерения проводятся на оборудовании, обычно имеющемся в каждой лаборатории ЭМС. К недостаткам можно отнести большую длину кабеля, подвергаемого испытаниям, и необходимость проведения измерений в экранированном помещении.

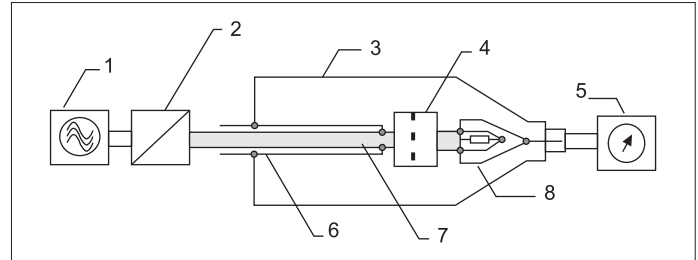


Рис. 5. Схема установки для испытания соединителей триаксиальным методом:
1 — генератор; 2 — аттенуатор; 3 — труба; 4 — исследуемый соединитель;
5 — измерительный приемник; 6 — удлиняющая трубка; 7 — соединительный кабель;
8 — переходное устройство с согласующим резистором

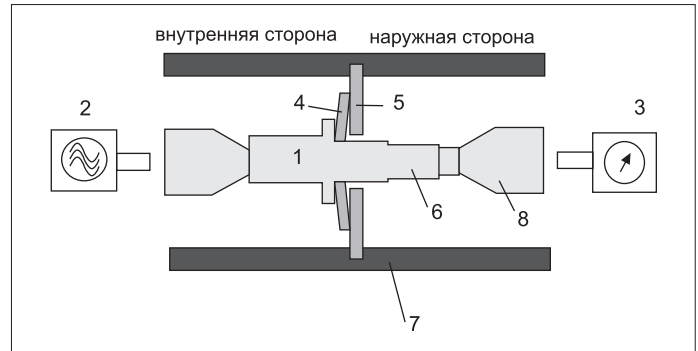


Рис. 6. Схема установки для испытания прокладок на ЭМС:
1 — соединитель; 2 — генератор; 3 — измерительный приемник;
4 — контактная пружина/прокладка; 5 — экранирующая перегородка;
6 — переходной адаптер; 7 — внешний проводник; 8 — внутренний проводник

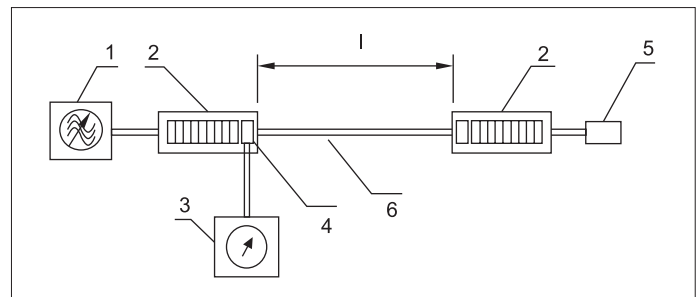


Рис. 7. Схема установки по методу поглощающих клещей:
1 — генератор; 2 — поглощающие клещи; 3 — измерительный приемник;
4 — датчик тока; 5 — согласованная нагрузка; 6 — испытываемый кабель

Еще одним методом измерения сопротивления связи является метод инъекционной линии (IEC 96-1 Amendment 2/1993.). Схема измерительной установки по этому методу показана на рис. 8. Сигнал с выхода синхрогенератора анализатора спектра подается на инъекционный провод, который крепится к испытываемому кабелю, дальний конец которого соединен с входом анализатора спектра, с помощью которого производится измерение проникающего сигнала.

$$Z_T = \frac{2}{l} \cdot \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} \cdot 10^{\frac{A_T}{20}},$$

где: $A_T = U_2/U_1$; U_1 — напряжение сигнала, подаваемого в провод-инжектор; U_2 — напряжение, измеренное на выходе испытуемого кабеля. Верхний частотный предел, до которого может быть измерено сопротивление связи по этому методу, зависит от длины испытуемого отрезка образца кабеля и составляет до 3 ГГц.

Иногда из-за организационных сложностей согласования техзаданий на испытания оборудования на ЭМС или утверждения результатов испытаний оказывается проще проводить испытания кабельных жгутов непосредственно по методам, по которым испытывается аппаратура на ЭМС. При этом на одном конце кабеля включается имитатор сигнала бортовой аппаратуры, на выходе с помощью контроль-

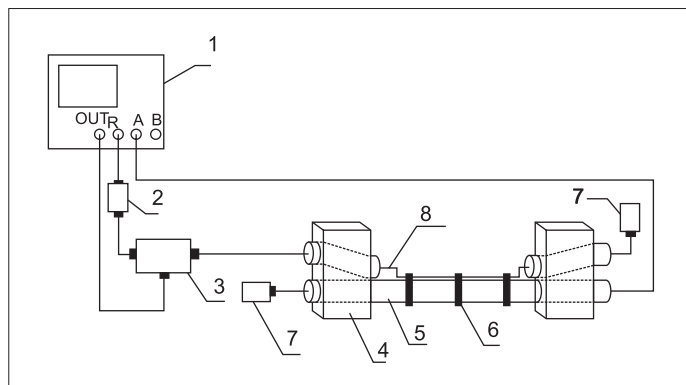


Рис. 8. Схема установки по методу инъекционной линии:
1 — анализатор цепей; 2 — аттенуатор 20 дБ; 3 — ответвитель; 4 — опорные панели;
5 — испытываемый кабель; 6 — липкая лента; 7 — согласованная нагрузка; 8 — инъекционная линия

но-проверочной аппаратуры контролируется наличие искажений за счет сигнала помехи, прошедшей через экран кабеля.

На рис. 9 показана осциллограмма сигнала помехи (импульсный затухающий синусоидальный сигнал) в последовательности импульсов цифрового кода. На рис. 10 представлена фотография части испытательной установки на воздействие затухающего синусоидального импульса. На экране осциллографа видно искажение сигнала из-за воздействия помехи.

Перечисленные методы могут быть использованы разработчиками или испытателями для оценки качества кабельных жгутов из состава БА.

Литература:

1. ОСТ 1 01205-2012 «Экранирование бортовой кабельной сети самолетов и вертолетов. Методы проведения испытаний с целью оценки эффективности экранирования».
2. ГОСТ Р 54429-2011 «Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия».
3. ГОСТ Р 53880-2010 «Кабели коаксиальные для сетей кабельного телевидения. Общие технические условия».
4. Balunless measurement of coupling attenuation of screened balanced cables up to 2 GHz. Bernhard Mund, Christian Pfeiler, 64rd IWCS Conference, Atlanta, GA, USA, October 2015.

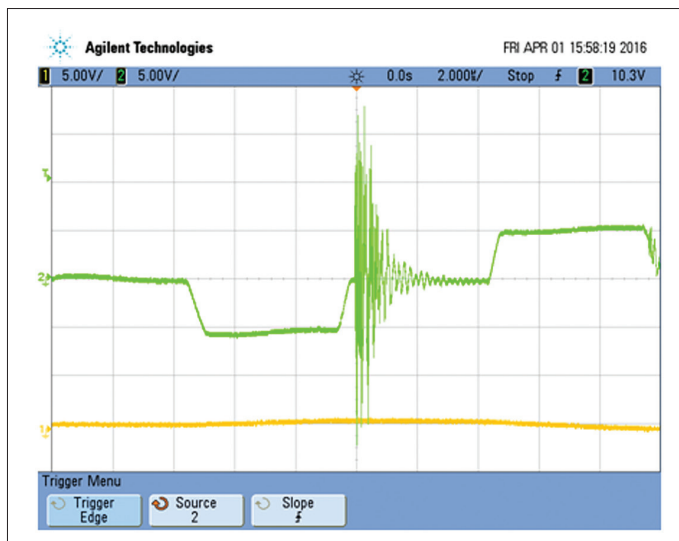


Рис. 9. Сигнал с затухающей синусоидальной импульсной помехой

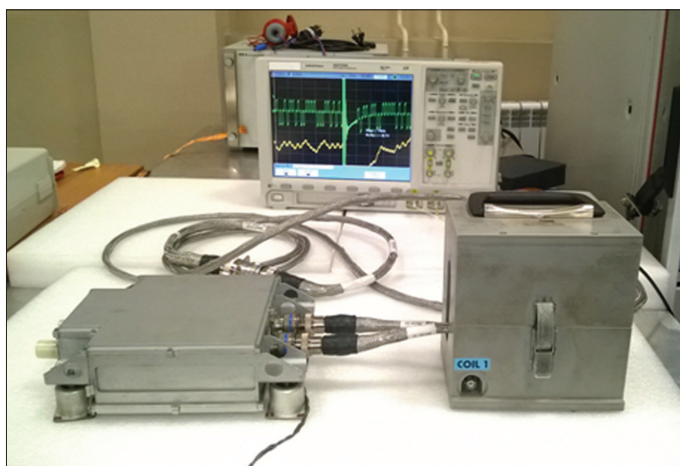
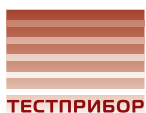


Рис. 10. Испытательная установка для исследования воздействия затухающей синусоидальной импульсной помехи

Статья опубликована в журнале «СВЧ» № 2'2017

Испытания на воздействие излучаемых электромагнитных помех



Электромагнитные поля являются источником электромагнитных помех, которые воздействуют на корпуса и линии связи и электропитания технических средств.

Источником электромагнитных полей являются как техногенные, так и природные факторы: излучение радиопередающих станций, радаров, промышленного оборудования электромагнитного фона Земли, галактические шумы и т. д.

При испытаниях на излучаемые электромагнитные помехи технические средства подвергаются воздействию электрическо-

го, магнитного или электромагнитного поля с уровнем, определенным в нормативных документах или техническом задании.

Испытательная лаборатория ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР» использует комплекс испытательного оборудования: генераторы, широкополосные усилители, набор антенн, беззховую экранированную камеру, ТЕМ-камеру, реверберационную камеру, другого оборудования, позволяющего проводить испытания на устойчивость к электромагнитным полям в диапазоне частот до 40 ГГц:

- ГОСТ РВ 6601-001-2008 (п. 5.5);
- КТ-160/14G (раздел 20.0);
- ГОСТ 30804.4.3.

