

Измерительный комплекс для определения устойчивости радиоэлектронной аппаратуры к помехам импульсного электромагнитного излучения

Р. А. РОДИН, К. Ю. САХАРОВ, В. А. ТУРКИН, О. В. МИХЕЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: sukhov@vniiofi.ru

Разработан измерительный комплекс для оценки помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры к преднамеренным импульсным электромагнитным помехам. Комплекс позволяет контролировать амплитудно-временные параметры воспроизводимых импульсных электромагнитных полей. Показано, что данный комплекс может быть востребован разработчиками беспилотного транспорта, интеллектуальных систем распределения электроэнергии, роботизированных систем.

Ключевые слова: электромагнитный импульс, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость.

A measurement complex for radio electronic equipment pulse electromagnetic interference immunity estimation is developed. The amplitude and time parameters of reproducing pulse electromagnetic fields can be monitored by complex. Developers of unmanned transportation, smart grid systems and robotics may demand measurement complex.

Key words: electromagnetic pulse, noise immunity, electromagnetic compatibility.

Один из важнейших вопросов, стоящих перед разработчиками радиоэлектронной аппаратуры, – обеспечение электромагнитной совместимости устройств. Задача состоит в том, чтобы уровни создаваемых оборудованием помех и устойчивость оборудования к внешним помехам находились в заданных стандартами пределах. Для подтверждения этого требования проводятся соответствующие испытания. Особенно важны испытания для бурно развивающихся систем беспилотного транспорта, интеллектуальных электrorаспределительных сетей и робототехники [1]. Для этих областей характерна высокая интеграция радиоэлектронных и электронно-вычислительных устройств. Например, беспилотный автомобиль или летательный аппарат содержат управляющий компьютер, системы связи LTE и Wi-Fi, поддерживающие стандарты беспроводной высокоскоростной передачи цифровых потоков данных по радиоканалам, системы спутникового позиционирования GPS и ГЛОНАСС, радары и лидары ближнего действия. Несколько чувствительных приёмных антенн и разветвлённая бортовая кабельная сеть – потенциальные пути проникновения помех. Для повышения быстродействия такие системы оперируют сигналами малых уровней, что ещё более снижает их помехозащищённость. Помеха, наведённая в одном из блоков, может повлиять на логику работы системы в целом, что недопустимо для систем, непосредственно связанных с безопасностью человека. Всё сказанное выше относится и к интеллектуальным электроэнергетическим сетям (smart grid), где разветвлённая система контроллеров управляет равномерным распределением нагрузки. В результате действия помехи и выхода из строя одного из контроллеров может возникнуть лавинный эффект, приводящий к дальнейшему разрушению сети [2].

Проводимые испытания, как правило, нацелены на оценку помехоустойчивости оборудования к условиям наихудшей электромагнитной обстановки, которая может сложиться в местах эксплуатации аппаратуры. Однако в стандарте [3] Международной электротехнической комиссии IEC существует понятие преднамеренных электромагнитных помех (ЭМП) (от английского IEMI – intended electromagnetic interference). Преднамеренные помехи наводятся с помощью специально созданных для этого излучателей. Чтобы разделить подобные помеховые сигналы по частотным диапазонам, введено понятие относительной ширины спектра $\Delta F_{\text{ЭМП}}$:

$$\Delta F_{\text{ЭМП}} = 2(f_{\text{в}} - f_{\text{н}}) / (f_{\text{в}} + f_{\text{н}}) \cdot 100, \quad (1)$$

где $f_{\text{в}}$, $f_{\text{н}}$ – верхняя и нижняя граничные частоты спектра помехи, соответственно [2].

Помехи, у которых относительная ширина спектра $\Delta F_{\text{ЭМП}}$, рассчитанная по формуле (1), оказывается менее 1 %, считаются узкополосными. При $\Delta F_{\text{ЭМП}}$ от 1 до 25 % помехи являются широкополосными, а если относительная ширина спектра составляет более 25 % – сверхширокополосными. В частности, к сверхширокополосным ЭМП относятся сверхкороткие электромагнитные импульсы. При длительности импульса порядка 150–200 пс его спектр занимает полосу от сотен мегагерц до единиц гигагерц. Подобные импульсы трудно обнаружить средствами радиомониторинга, при этом они эффективно проникают в приёмные тракты радиоэлектронной аппаратуры по основным и побочным каналам приёма [4]. Сверхкороткие электромагнитные импульсы наводят в сигнальных цепях цифровой радиоэлектронной аппаратуры помеховые сигналы, аналогичные рабочим по амплитудно-временным параметрам. Это при-

Т а б л и ц а 1

Характеристики излучателей

Излучатель	Частота повторения импульсов, кГц	E , кВ/м, на расстоянии 1 м от антенны	Длительность, нс	Тип антенны
И-1 И-2	1,0 1000	50,0 1,6	0,25 0,20	Решетка из четырёх ТЕМ-рупоров

водит к потере информации, сбоям и другим нарушениям функционирования [5].

В Российской Федерации действует комплекс стандартов по обеспечению безопасности автоматизированных систем в защищённом исполнении от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий, в том числе – излучаемых импульсных помех. В настоящей работе авторы разработали измерительный комплекс, соответствующий требованиям стандарта [6] по характеристикам средств обнаружения преднамеренных ЭМП и требованиям стандарта [7] к параметрам средств воспроизведения испытательных сигналов. В [7] установлено, что необходимо проводить испытания автоматизированных систем на устойчивость к следующим видам электромагнитных импульсов:

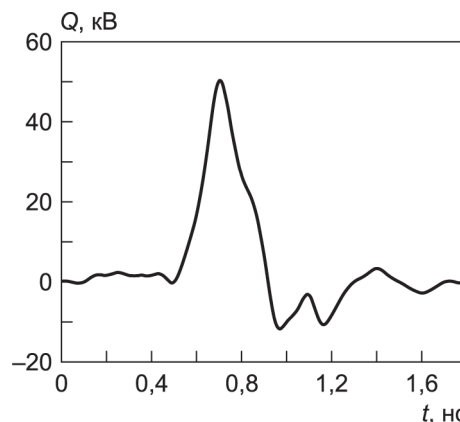
однократным наносекундным импульсам длительностью 100 нс и напряжённостью электрического поля 1–10 кВ/м;

периодическим (с частотой повторения 1 кГц) наносекундным импульсам длительностью 0,1–1,0 нс и напряжённостью электрического поля 0,1–30 кВ/м;

периодическим (с частотой повторения 1 МГц) наносекундным импульсам длительностью 0,1–1,0 нс и напряжённостью электрического поля 0,01–1,0 кВ/м.

Наиболее вероятно воздействие указанных периодических импульсов. Поэтому в состав измерительного комплекса включили излучатели электромагнитных импульсов, имеющие высокую и низкую частоты повторения. Излучатели состоят из полупроводниковых генераторов импульсов напряжения, соединённых фидером с антеннами в виде решётки из четырёх ТЕМ-рупоров: по два сверху и снизу. Характеристики излучателей приведены в табл. 1. На рисунке показана форма импульса, воспроизводимого излучателем И-1. По оси ординат отложен показатель качества $Q=ER$, где E – амплитуда импульса, $R=1$ м – расстояние до антенны. Показатель качества позволяет сравнивать эффективность различных излучателей, а также рассчитывать напряжённость электрического поля на заданном расстоянии от антенны.

Для контроля параметров воспроизводимых импульсов в состав комплекса включён измерительный преобразователь на основе полосковой линии ИППЛ-Л [8]. Данный тип преобразователя характеризуется переходной характеристикой, которая имеет ступенчатую форму. Это означает, что сигнал на выходе преобразователя повторяет форму измеряемого импульса поля. Преобразователь ИППЛ-Л позволяет измерять напряжённость электрического поля в диапазоне 0,01–100 кВ/м. Время нарастания переходной характеристики преобразователя составляет 35 пс, длительность ступенчатого участка переходной характеристики – 5,5 нс. Погрешность измерений ИППЛ-Л составляет не более 10 %.



Форма импульса, воспроизводимого излучателем И-1 на расстоянии 1 м от апертуры антенны по оси излучения

Для регистрации импульсов на выходе ИППЛ-Л применяют осциллограф прямого преобразования Tektronix DPO 71604C (США) с полосой пропускания 16 ГГц. Можно использовать и другой тип осциллографа, если его полоса пропускания составит не менее 10 ГГц.

В соответствии со стандартом [6] в состав комплекса добавлен обнаружитель преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Обнаружитель представляет собой компактное устройство с аккумуляторным питанием. Прибор содержит приёмную антенну в виде полосковой линии, соединённую с пиковым детектором [9]. На экране обнаружителя индицируется амплитуда импульсов электрического поля в точке измерений. Устройство предназначено для регистрации импульсов электрического поля амплитудой 0,02–50 кВ/м, длительностью не менее 0,2 нс и частотой повторения от $1-1 \cdot 10^6$ Гц. При испытаниях на устойчивость

Т а б л и ц а 2

Результаты исследований помехоустойчивости беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 3

Излучатель	Максимальное расстояние, на котором фиксировался отказ, м	E , кВ/м	Тип отказа
И-1	35	1,40	Невосстанавливаемый
И-2	50	0,07	Восстанавливаемый

обнаружитель применяется как индикатор для оперативно-го контроля напряжённости электрического поля.

Разработанный комплекс использовали для оценки помехоустойчивости беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 3. Во время испытаний авторы настоящей статьи зафиксировали отказы, выражающиеся в потере связи с аппаратом, отсутствии передачи сигналов телеметрии и видеоизображения. Причём при воздействии излучателем И-1 отказы были невосстанавливаемыми и требовалась принудительная ручная перезагрузка контроллера аппарата, а при воздействии излучателем И-2 связь восстанавливалась сразу же после прекращения излучения. Следовательно, импульсные воздействия, имеющие высокую частоту повторения, даже при низкой амплитуде импульсов эффективно подавляют канал связи. Сильные воздействия с низкой частотой повторения создают наводки непосредственно в цепях цифровых электронных схем, что приводит к невосстанавливаемым сбоям электронно-вычислительных устройств. В табл. 2 представлены сведения о параметрах поражения аппарата.

С помощью созданного измерительного комплекса можно оценивать критериальные уровни импульсного воздействия. Измерительный комплекс позволяет создавать воздействия различных типов и обнаруживать разные типы отказов. В частности, показана уязвимость беспилотного летательного аппарата к преднамеренному силовому электромагнитному воздействию.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники (скр.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.0003 от 28.08.2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Л и т е р а т у р а

1. **Уилльямс Т.** ЭМС для разработчиков продукции. М.: Издательский Дом «Технологии», 2003.

2. **CISPR/1270/INF.** CISPR guidance document on EMC of equipment connected to Smart Grid. IEC, 2014.

3. **IEC 6100–2–13.** Electromagnetic compatibility (EMC). Pt. 2–13: Environment–High-power electromagnetic (HPEM) environments–Radiated and conducted.

4. **Шевырев А. В., Невзоров Ю. В., Пименов П. Н., Фомина И. А., Пронин С. А.** Анализ устойчивого функционирования робототехнических комплексов нового поколения в условиях преднамеренного воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2. С. 240–251.

5. **Акбашев Б. Б., Балюк Н. В., Кечиев Л. Н.** Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий. М.: Грифон, 2014.

6. **ГОСТ Р 56093–2014.** Защита информации. Автоматизированные системы в защищённом исполнении. Средства обнаружения преднамеренных силовых электромагнитных воздействий.

7. **ГОСТ Р 52863–2007.** Защита информации. Автоматизированные системы в защищённом исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям.

8. **Sakharov K. Yu., Turkin V. A., Mikheev O. V., Dobrovtorsky M. I., Sukhov A. V.** Microstrip transducer for UWB EMP characterization // Proc. American Electromagnetics Symposium AMEREM-2014. Albuquerque, USA, 27-31 July 2014. P. 26.

9. **Сахаров К. Ю., Туркин В. А., Михеев О. В., Сухов А. В., Лафишев М. А., Еряшев Д. И.** Аппаратура для мониторинга электромагнитных излучений в сверхкороткоимпульсном диапазоне длительностей // Технологии электромагнитной совместимости. 2011. № 4. С. 58–61.

Дата принятия: 23.07.2018.