

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСЦИЛЛОГРАФОВ ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ С ФУНКЦИЕЙ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОЭМИССИИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ НА ПРИМЕРЕ ОБОРУДОВАНИЯ ROLDE&SCHWARZ

THE USE OF HIGHLY SENSITIVE OSCILLOSCOPES WITH FFT FUNCTION FOR LOCALIZATION OF INCREASED EMISSION SOURCES WITHIN ELECTRONIC COMPONENTS BY THE EXAMPLE OF ROLDE&SCHWARZ EQUIPMENT

Лемешко Н.В. (N. Lemeshko), к.т.н., с.н.с. НТЦ Анализа ЭМС ФГУП НИИР

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема электромагнитной совместимости становится все острее. Широкая номенклатура технических средств приводит к неравномерной нагрузке частотного спектра сигналами радиопередающих устройств, индустриальным радиошумом, излучаемыми помехами технических средств. Для обеспечения допустимого уровня электромагнитного фона массово выпускаемое оборудование проходит сертификационные испытания на соответствие нормам помехоэмиссии.

Ввиду этого разработчикам оборудования на стадии проектирования необходимо применять комплекс мер по снижению помехоэмиссии. К общесистемным методам обеспечения ЭМС относят экранирование, заземление, грамотную трассировку критических линий печатных узлов [1]. Эффективность комплекса таких мер проверяется в ходе лабораторных испытаний по электромагнитной совместимости (ЭМС).

Вместе с тем, в составе радиоэлектронных средств обычно присутствуют элементы, которые определяют помехоэмиссию в выбранной полосе частот. Это могут быть линии передачи или электронные компоненты. В первом случае помехоэмиссия обычно определяется значительным пространственным разномом прямого и обратного проводников линий передачи либо неправильным расчетом их параметров и может быть снижена оптимизацией топологии по критериям ЭМС. Во втором случае спектр потенциальных причин несравненно шире, и выявить их обычно очень трудно.

Возможность определения компонентов и узлов с повышенной помехоэмиссией на практике оказывается весьма полезной и для внутрисистемной ЭМС, ведь не исключается влияние таких полей на соседние элементы. В настоящей статье рассматривается возможность использования современных высокочувствительных осциллографов для локализации ис-

точников повышенной помехоэмиссии на печатных узлах.

ПРОБЛЕМА ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОЭМИССИИ

Практика проектирования и сертификации радиоэлектронных средств показала, что не только топология печатных узлов, но и компонентная база играет важнейшую роль в формировании излучаемых радиопомех. И если правильное расположение и структура линий передачи способна сильно ослабить генерацию радиопомех, то электронные компоненты с позиции разработчика остаются «черным ящиком» с малопредсказуемыми свойствами.

Как правило, проектные лаборатории не имеют собственных технических средств для оценки помехоэмиссии, а заказывать исследования на стороне слишком дорого. Кроме того, такие исследования, выполняемые в общем плане, не будут эффективными в большинстве случаев, поскольку современная компонентная база редко представлена образцами с детерминированной функциональностью. Следовательно, и помехоэмиссия, зависящая от внутреннего токораспределения, будет определяться режимом работы устройства в текущий момент. Фирмы-производители электронных компонентов обычно не предоставляют никакой информации по данному вопросу.

Расчетный метод оценки [2] позволяет оценить интенсивность только той части радиопомех, которая формируется проводниками печатного узла, поскольку конструкторское исполнение интегральных компонентов обычно неизвестно.

Ввиду этого в состав мер по обеспечению ЭМС и в качестве подготовки к сертификационным испытаниям следует признать целесообразным изготовление тестового образца будущего электронного устройства с целью не только обеспечить его функциональную отладку, но и провести изыскания по вопросу помехоэмиссии. Это позволит наиболее тщательно подготовиться к последующему про-

ведению сертификационных испытаний. В ходе таких предварительных исследований важно выявить и локализовать элементы на печатном узле, отличающиеся наибольшей помехоэмиссией, поскольку их вклад в формируемый электромагнитный фон будет определяющим.

Для экспериментальных исследований в области ЭМС обычно используют анализаторы спектра или измерительные приемники, отличающиеся высокой точностью измерений [3], комплектуемые датчиками ближнего поля либо измерительными антеннами. Однако эти приборы отличаются спецификой использования и высокой стоимостью в сопоставлении, например, с широко применяемыми осциллографами. Это является основным препятствием, которое приводит к игнорированию разработчиками самой возможности таких исследований опытных образцов. Поэтому разработка и использование нового оборудования, возможного к применению при решении рассматриваемой задачи и имеющего приемлемую цену, способных качественно улучшить систему проектных мер по обеспечению ЭМС.

ТРЕБОВАНИЯ К ОБОРУДОВАНИЮ, ИСПОЛЬЗУЕМОМУ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОЭМИССИИ

Датчики ближнего поля, применяемые при решении задач ЭМС, обычно являются широкополосными преобразователями с характеристиками, несколько худшими, чем у измерительных антенн, т.к. с помощью них выполняются только оценочные измерения. Спектрограммы излучений, зафиксированных с использованием датчиков ближнего поля для разных участков спектра, не могут быть соотнесены непосредственно, т.к. обычно такие датчики не калибруются. Из изложенного следует, что никаких существенных требований к датчикам ближнего поля не предъявляется. Основным из них является полоса рабочих частот, которая обычно состав-

ляет от 30 до 3000 МГц, в которой в основном и выполняется анализ излучений электронных компонентов [1]. В частности в такой полосе работают датчики ближнего поля из комплекта R&S HZ-15. В отдельных случаях для повышения чувствительности датчиков ближнего поля используют малошумящие усилители, имеющие коэффициент усиления порядка 20...30 дБ, и приемлемый коэффициент шума.

С точки зрения функциональности регистрирующий прибор должен быть аналогичен анализатору спектра, за исключением, возможно, требований по амплитудной и частотной точности, а также минимально достижимой полосе разрешения. Для улучшения визуализации должен обеспечиваться панорамный обзор в широкой полосе частот.

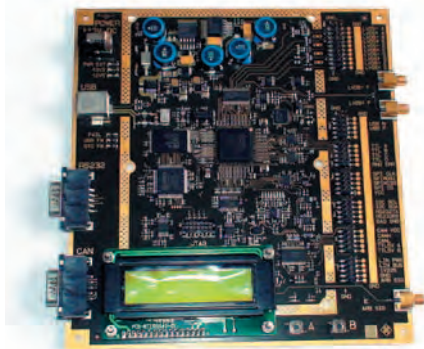


Рис. 1. Модуль R&S RT-ZB1, используемый в качестве объекта тестирования

Основным ограничением, препятствующим воспроизведению функций анализатора спектра как опций в других приборах, является достижимая широкополосность с сохранением невысокой стоимости. Как правило, анализаторы спектра строятся на более дорогой элементной базе, которая не применяется в осциллографических каналах. Вторым фактором является достижимая чувствительность, которая у анализаторов спектра существенно выше по той же причине.

Современные цифровые осциллографы обладают весьма широкой рабочей полосой, иногда достигающей 10 ГГц и более. Проблема повышения чувствительности радиочастотной части также решается снижением собственных шумов усиления и уменьшением шага развертки по вертикали. Таким образом, характеристики радиочастотной части широкополосных цифровых осциллографов вполне допускают обработку сигналов в целях измерений по электромагнитной совместимости.

В некоторых осциллографах, даже не обладающих большой рабочей полосой, сделана попытка реализовать функцию быстрого преобразования Фурье с целью организации подобия анализатора спектра. Например, это сделано в осциллографе

LeCroy WA112 [5]. Однако эти осциллографы подводит чувствительность, а небольшой объем памяти и качество отображения информации о результатах БПФ делают последнее малоэффективным.

Таким образом, для поиска и локализации элементов с повышенной помехоэмиссией целесообразно использовать подходящие по перечисленным характеристикам осциллографы, в которых реализация БПФ позволяет добиться результатов, сопоставимых по качеству с аналогичными для анализаторов спектра.

Для демонстрации возможности практического решения этой задачи была выбрана серия осциллографов RTO R&S, радиочастотная часть которых соответствует отмеченным выше требованиям. В частности, верхняя граница полосы пропускания составляет от 600 до 4000 МГц.

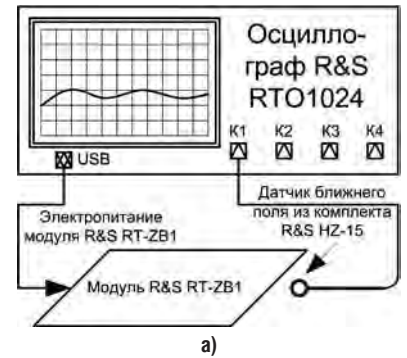
ФУНКЦИЯ БПФ В ОСЦИЛЛОГРАФАХ СЕРИИ RTO ФИРМЫ R&S

Основным отличием осциллографов от анализаторов спектра применительно к рассматриваемой задаче является то, что анализ в частотной области проводится по другому принципу, а именно на основе обработки записанного в память дискретного представления сигнала. В осциллографах серии R&S RTO реализовано покадровое ПБФ с перекрытием, фактически означающее многократную его реализацию для записи, полученной за единичный цикл. Это позволяет, с одной стороны, улучшить поиск нестационарных или случайных частотных составляющих сигналов, а с другой — дает возможность проводить их непрерывный частотный анализ по аналогии с анализаторами спектра, достигаемый за счет перекрытия соседних кадров. Коэффициент перекрытия, который может задаваться произвольно, определяет количество используемых в обработке данных. Размер каждого кадра зависит от длины записи, коэффициента перекрытия и размера БПФ.

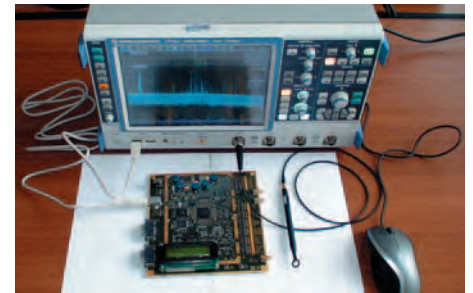
Измерения в области ЭМС всегда связаны со статистической обработкой результатов, зависящих от ряда случайных факторов. Поэтому достаточно высокая степень перекрытия, даже при соответствующем ограничении полосы разрешения, позволяет значительно повысить качество и точность результатов измерений. Основным ограничением в этом смысле является максимально допустимое время обработки данных при выполнении БПФ.

Анализ сигналов в частотной области предполагает использование оконных функций, сглаживающих спектральные кривые, повышающих разрешение БПФ и уменьшающих

погрешности, связанные с просачиванием комбинационных спектральных составляющих [6]. Тип оконной функции оказывает значительное влияние на вид отображаемого спектра и влияет на достижимые в выбранном режиме показатели БПФ. В осциллографах серии RTO имеется возможность выбора практически всех наиболее распространенных типов оконных функций.



а)



б)

Рис. 2. Измерительная установка: а) схема; б) фотография

В остальном настройки БПФ соответствуют привычным для анализаторов спектра. Таким образом, с позиции потенциальной применимости рассматриваемое оборудование вполне соответствует выявленным выше требованиям.

ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСЦИЛЛОГРАФОВ СЕРИИ RTO ФИРМЫ R&S ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОЭМИССИИ

Примером, демонстрирующим возможность локализации источников помехоэмиссии на печатных узлах, может являться исследование модуля R&S RT-ZB1, предназначенного для измерения скорости импульсных сигналов в комплексе с некоторым другим оборудованием. Модуль выполнен в виде печатного узла (рис. 1). Анализ формируемого им ближнего поля на практике может потребоваться не только для последующего проведения сертификационных испытаний, но и при решении задач внутрисистемной ЭМС — при встраивании его в измерительные комплексы.

Для оценки помехоэмиссии использовался комплект датчиков ближнего поля R&S HZ-15, а также осциллограф R&S RTO1024 с полосой пропускания

Цифровые осциллографы серии RTO: 600 МГц, 1 ГГц, 2 ГГц, 4 ГГц; 2 и 4 канала

Осциллографы R&S® RTO сочетают превосходное качество отображения сигнала, высокую скорость сбора данных и первую в мире цифровую систему синхронизации в реальном времени с компактной конструкцией прибора в классе устройств с полосой пропускания 600 МГц, 1 ГГц, 2 ГГц и 4 ГГц. Приборы оснащены функциями измерения и анализа с аппаратным ускорением.

Основные свойства

- Быстрое обнаружение аномалий сигнала
- Аппаратное ускорение анализа
- Высокоточная цифровая система синхронизации
- Новый уровень удобства работы
- Убедительная точность

Характерные особенности

- Быстрое обнаружение аномалий сигнала
- Один миллион сигналов в секунду: поиск неисправностей не требует догадок
- Высокие скорости сбора данных без ограничения функциональных возможностей
- Быстрый анализ ошибок с функцией просмотра истории

Аппаратное ускорение анализа

- Высокая скорость измерений, даже для сложных функций анализа
- Спектральный анализ на основе БПФ: эффективно и удобно
- Испытания на соответствие маске: быстрая настройка, надежные результаты
- Усложненный анализ с использованием одновременно до трех сигналов в каждом канале

Высокоточная цифровая система синхронизации

- Точные измерения благодаря малому джиттеру при синхронизации
- Высокая чувствительность запуска во всей полосе пропускания
- Регулируемый цифровой фильтр сигнала синхронизации

Новый уровень удобства работы

- Четкая структура меню позволяет быстро начать работу
- Цветная маркировка органов управления, понятная для пользователя
- Пиктограммы сигналов с функцией перетаскивания
- Благодаря полупрозрачным диалоговым окнам измеряемые сигналы всегда полностью видимы

Убедительная точность

- Точные измерения благодаря очень низкому уровню собственного шума
- Широкий динамический диапазон, благодаря одноядерному аналогово-цифровому преобразователю
- Полная ширина полосы пропускания, даже для значений чувствительности ≤ 10 мВ/дел
- Малые погрешности коэффициента усиления и смещения, независимо от температуры
- Надежная межканальная развязка предотвращает перекрестные помехи

Опция логического анализатора

Опция логического анализа RTO-V1 позволяет анализировать логические состояния цифровых шин данных по 16 каналам с тактовой частотой до 400 МГц, разрешением по времени 200 пс (частота дискретизации 5 ГГц) и с глубиной записи до 200 миллионов точек. При этом даже с включенными цифровыми каналами осциллографы RTO обеспечивают скорость обновления экрана свыше 200 тысяч осциллограмм в секунду. Опция RTO-V1 легко может быть установлена на любую модель осциллографа RTO.

Демодуляция сигналов на квадратурные составляющие

Программная опция RTO-K11 позволяет захватывать модулированные входные сигналы, выполнять их аппаратную векторную демодуляцию, фильтрацию и повторную выборку соответствующих I/Q данных для обеспечения требуемой частоты дискретизации. Полученные I/Q данные затем доступны для последующего анализа как в стандартных математических пакетах типа MatLab, так и в ПО Rohde-Schwarz FS-K96 по анализу сигналов OFDM. В зависимости от модели осциллографа максимальная полоса анализа входных сигналов составляет до 4 ГГц. Превосходные аппаратные характеристики осциллографов RTO обеспечивают анализ квадратурно-модулированных сигналов с опцией FS-K96 с EVM на уровне -40 дБ вплоть до частот несущей 3 ГГц.

Анализ целостности сигналов

Опция анализ джиттера R&S® RTO-K12 Jitter Analysis позволяет проводить автоматические измерения таких параметров, как частота, период, ошибка временного интервала, джиттер от периода к периоду, джиттер за N периодов, скорость передачи данных и др. Функция Track function обеспечивает более глубокий анализ измеряемых параметров с возможностью отображения результатов измерений в виде тренда измерения, таблицы, гистограммы, спектра, глазковой диаграммы. Уникальной особенностью опции является утилита тестирования по маске, позволяющая создавать шаблоны для быстрого тестирования глазковых диаграмм. Кроме того в опции имеется возможность программного восстановления тактового сигнала (Software-CDR).

Опция R&S® RTO-K13 Clock Data Recovery (CDR) активирует схему аппаратного восстановления тактового сигнала, реализованную в интегрированной микросхеме осциллографа RTO. Для восстановления тактового сигнала используются режимы ФАПЧ первого и второго порядка. Скорость передачи данных регулируется от 200 кбайт/с до 2,5 Гбайт/с для осциллографов RTO1002...24, до 5 Гбайт/с для RTO1044. В отличие от Software-CDR, использующей постобработку захваченных данных, аппаратное восстановление тактового сигнала реализовано в реальном времени, что позволяет использовать тактовый сигнал для синхронизации при измерении джиттера и построении глазковых диаграмм.



www.rohde-schwarz.ru

1 ГГц. Схема измерительной установки приведена на рис. 2 (а). Она включает в себя также один из датчиков из комплекта R&S HZ-15 (конкретный тип зависит от полосы частот и типа исследуемой составляющей поля). Фотография измерительной установки приведена на рис. 2 (б).

Поскольку рассматриваемым практическим приложением функции БПФ осциллографа является поиск источников повышенной помехоэмиссии на печатном узле и характерных частот таких излучений, то целесообразно воспользоваться прямоугольным окном преобразования, характеризующимся наилучшим разрешением по частоте. Амплитудные характеристики радиопомех могут определяться менее точно без ущерба для общего решения задачи.

Первым вопросом при проведении исследований радиопомех является определение минимальной чувствительности регистрирующего устройства, определяемой собственными шумами БПФ. Он измеряется в режиме заглушенного входа при максимальной чувствительности, минимально достижимой полосе разрешения и максимальной полосе обзора, а также при входном сопротивлении, равном 50 Ом. Спектр, характерный для имеющегося образца оборудования в указанном режиме, приведен на рис. 3.

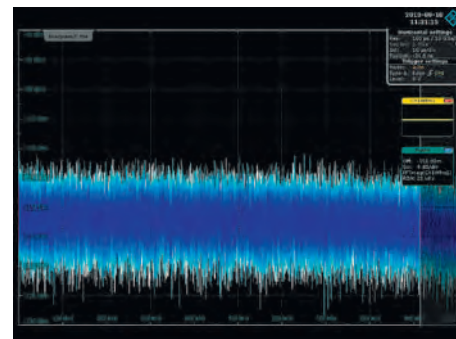


Рис. 3. Спектр собственных шумов БПФ осциллографа R&S RTO1024

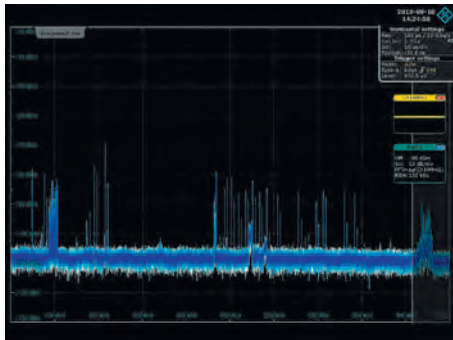
Как видно из представленного рисунка, достигнутый уровень собственных шумов, соответствующий равной 20 кГц полосе разрешения, составляет порядка -105 дБм в полосе частот до 1 ГГц. Это несколько выше, чем у анализаторов спектра, однако вполне приемлемо для решения задач, связанных с электромагнитной совместимостью.

Поскольку пробники ближнего поля чувствительны и к радиоизлучениям передающих станций, то помехоэмиссия компонентов печатного узла должна оцениваться по повышению уровня спектральных составляющих. Определение компонентов с наибольшей помехоэмиссией выполняется путем перемещения выбранного датчика вдоль поверхности платы с вари-

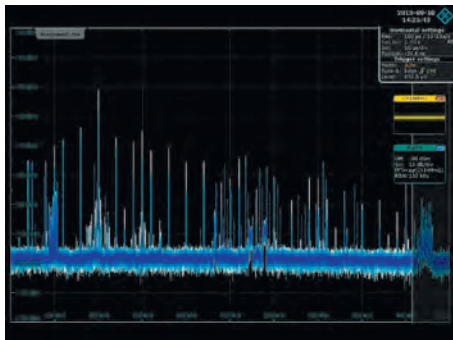
рованием его ориентации для исключения пространственной избирательности.

Для выполнения исследований из комплекта R&S HZ-15 были выбраны датчики магнитной составляющей H50-1 и электрической составляющей E02 с рабочей полосой до 3 и до 1,5 ГГц и калибровочными коэффициентами порядка 25 и 27 дБ соответственно.

Проведенные исследования показали, что наибольшей интенсивностью излучения в ближней зоне характеризуется область вблизи интегрального компонента XILINX Spartan XC3S1600E, установленного в центре печатного узла (см. рис. 1). Измерения выполнялись с полосой разрешения 100 кГц в режиме вычисления среднеквадратичного значения для каждой точки спектра. Полученные спектрограммы приведены на рис. 4 и 5: в последнем случае приведены также эскизы осциллограмм сигналов с датчика E02.



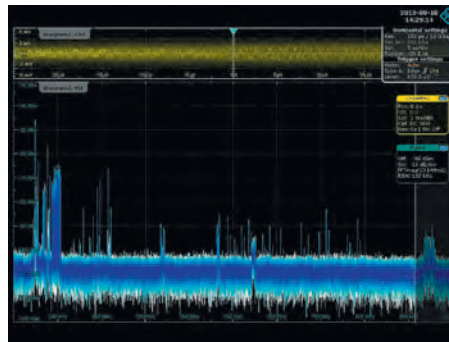
а)



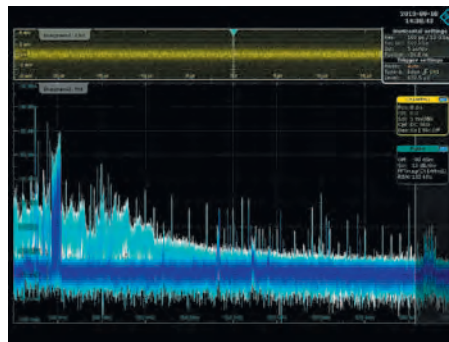
б)

Рис. 4. Оценочные спектрограммы ближнего поля, полученные с помощью датчика магнитной составляющей: а) в свободном пространстве (эфирные наводки); б) вблизи интегрального компонента XILINX Spartan XC3S1600E

Из представленных спектрограмм следует, что вблизи исследуемого интегрального компонента ближнее поле имеет сложную структуру и характеризуется широкой полосой частот. На спектрограмме, полученной при помощи датчика магнитного поля (рис. 4), наиболее явно видны гармоники, порождаемые импульсными процессами. Уровень этих гармоник весьма существенен, они определяют характерные частоты, на которых могут быть зафикси-



а)



б)

Рис. 5. Оценочные спектрограммы ближнего поля, полученные с помощью датчика электрической составляющей: а) в свободном пространстве (эфирные наводки); б) вблизи интегрального компонента XILINX Spartan XC3S1600E

сированы превышения норм помехоэмиссии.

Практика решения вопросов ЭМС при проектировании радиоэлектронных средств показала, что гармонические составляющие электромагнитного поля оказываются наиболее опасными в плане наводок из-за своей энергетической насыщенности. Например, они могут приводить к недопустимому ухудшению параметров каналов эфирной связи за счет снижения отношения «сигнал/шум». С увеличением расстояния они существенно ослабевают, равно как и при использовании экранирующих элементов, но, например, при компактном размещении ряда печатных узлов в блоке такие составляющие недопустимо не учитывать.

Спектрограмма, полученная при помощи второго датчика (рис. 5), позволяют сделать вывод о том, что электрическая составляющая ближнего поля характеризуется сплошным спектром на частотах до 600 МГц и не является стационарной (на рис. 5 (б) более светлая область соответствует эффекту послесвечения длительностью 0,3 с), т.е. структура и характеристики ближнего поля изменяются во времени.

Приведенные результаты не только подтверждают возможность использования высокочувствительных цифровых осциллографов с функцией БПФ для локализации источников повышенной помехоэмиссии с применением датчиков ближнего поля, но и

свидетельствуют о том, что при грамотном проведении исследований можно получить информацию, весьма ценную для решения задач внутрисистемной электромагнитной совместимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проблема локализации источников эмиссии электромагнитных излучений в наиболее употребительном частотном диапазоне может быть решена с применением альтернативных анализаторов спектра и измерительным приемникам средств — широкополосных цифровых осциллографов с функцией БПФ, реализованных на должном уровне и обладающих широкими возможностями для вариации параметров.

В будущем можно ожидать дальнейшее совершенствование как радиотрактов осциллографов, так и их математического обеспечения, что станет дополнительным фактором конвергенции функций анализа радиосигналов в частотной и временной областях, в т.ч. при решении задач по электромагнитной совместимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. — Пер. с англ. Кармашева В.С., Кечиева Л.Н. М.: Издательский дом «Технологии», 2003, с. 540.
2. Лемешко Н.В. Теоретические основы моделирования сертификационных испытаний радиоэлектронных средств по эмиссии излучаемых радиопомех. Монография. М.: МИЭМ, 2012, с. 196.
3. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. М.: Горячая линия — Телеком, 2006, с. 492.
4. Интернет-ресурс <http://www.rohde-schwarz.ru>.
5. Интернет-ресурс <http://www.lecroy-rus.ru>.
6. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Выпуск 2. Пер. с англ. Писаренко В.Ф. М.: Мир, 1972, с. 288. □

The present article contains the evaluation of the use of highly sensitive digital oscilloscopes with FFT function for the search of increased emission sources within electronic components. You will get to know about the importance of the problem analyzed as well as the requirements to the measuring means used therefore. The article includes an example that confirms the potential marketability and prospects of the mentioned modern oscilloscopes use.