

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСЦИЛЛОГРАФОВ R&S СЕРИИ RTB 2000

В статье показана необходимость выполнения статистических исследований динамических характеристик покупных модулей при их использовании в составе электронных изделий. Проанализирована схема для измерений динамических характеристик, предложен алгоритм статистического исследования. Показано, что осциллографы R&S серии RTB 2000, имеющие встроенный генератор сигналов, являются удобным средством для измерений динамических характеристик электронных модулей.

ВВЕДЕНИЕ

Электронные устройства можно проектировать двумя способами. Первый из них — классический — основан на декомпозиции функциональной схемы устройства на отдельные модули. Далее на основе установленных требований выполняется проектирование каждого модуля. Таким образом, технические решения для каждого модуля определяются разработчиком устройства.

Второй способ проектирования основан на системной интеграции, при которой отдельные или, в предельном случае, все модули представляют собой подходящие по характеристикам функционально и конструктивно законченные покупные изделия. Такой подход обоснован при мелко- и даже среднесерийном производстве, поскольку закупаемые электронные модули являются изделиями массового выпуска и потому экономически выгодны. В частности, весьма часто в качестве покупных изделий применяются DC/DC-преобразователи, вторичные источники питания, генераторы сигналов и т. д. Использование такого решения может несколько усложнять конструкцию электронных устройств и увеличивать массогабаритные характеристики, но это обстоятельство для большинства электронных устройств не существенно [1].

Для правильного выбора покупных электронных модулей (ЭМ) обычно предоставляется необходимая справочная информация, которая не всегда бывает полной в понимании разработчика конкретного электронного устройства. Весьма важными были и остаются характеристики переходных процессов, вызванных короткими импульсами и воздействиями вида функции включения, имеющие широкую полосу частот и потому способные передаваться через ЭМ в последующие узлы или, как минимум, формироваться на их входах. Обобщенно такие характеристики будем называть динамическими, и их значимая

совокупность должна определяться разработчиком для каждого конкретного ЭМ в проектируемом устройстве.

Для ЭМ собственной разработки динамические характеристики (ДХ) будут в большинстве случаев также важны, однако они могут быть оценены путем моделирования, выполняемого на основе известных схемных решений. Для покупных ЭМ такой информации обычно нет, равно как нет четкого представления о качестве элементной базы. Именно по этой причине проблема измерения динамических характеристик для покупных ЭМ оказываются важнее, чем для ЭМ собственного производства. Даже в пределах одной партии ЭМ будет наблюдаться разброс ДХ, обусловленный различиями в характеристиках элементной базы, неидеальностью монтажа и электрических соединений.

Практика проектирования показала, что наличие значительного разброса ДХ, а тем более существенных выбросов в сигналах создает условия для нестабильной работы электронных устройств. Поэтому необходимо проводить статистические оценки ДХ на основе их многократных измерений, проводимых для ряда одинаковых ЭМ.

Целью настоящей работы является анализ методов исследования ДХ с целью выбора позволяющих реализовать их средств измерений.

ОСНОВНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМ

Перед рассмотрением схем измерений ДХ целесообразно определить их совокупность. Учитывая специфику типовых проектных задач, ДХ можно классифицировать так, как показано ниже [2], причем на практике для конкретного применения ЭМ могут быть значимыми одна или несколько групп характеристик.

Численные характеристики:

- длительность спада/нарастания сигналов, определенная по заданному критерию;
- длительность переходного процесса, определенная по заданному критерию;
- амплитудные характеристики переходного процесса, включая начальные и конечные установившиеся значения сигналов;
- прочие показатели, характеризующие ход динамических процессов в ЭМ.

Качественные характеристики:

- наличие или отсутствие у сигналов особенностей, удовлетворяющих заданному критерию;
- наличие или отсутствие в структуре сигналов импульсных составляющих, способных воздействовать на другие узлы в электронном изделии.

Последний пункт в представленном перечислении требует пояснения. Как известно [3], поражающий эффект радиопомех кондуктивного типа зависит от их энергетика, а проникающая способность — от ширины полосы частот. В проектируемом устройстве обычно имеются тракты с небольшой полосой пропускания, в которые будут попадать некоторые спектральные составляющие широкополосной помехи. При достаточном уровне они будут восприниматься как мешающие сигналы. Для цифровых устройств импульсные радиопомехи могут приводить к непосредственному возникновению ошибочных логических состояний. Оба названных механизма способны привести к устойчивому распространению искаженных сигналов и, в конечном счете, переносимой ими информации в электронном устройстве. Это особенно актуально, учитывая общую тенденцию к снижению мощности полезных сигналов.

Таким образом, исследование ДХ ЭМ направлено и на обеспечение внутрисистемной электромагнитной совместимости. Расчет критических показателей импульсных помех должен выполняться на основе специальных методик или путем схемного моделирования электронного устройства. Умозрительные выводы здесь малопригодны.

ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭМ

Для выбора подходящих средств измерений необходимо рассмотреть состав схемы, для измерения ДХ [3]. Динамические характеристики могут измеряться для активных и пассивных ЭМ; типовая схема измерений представлена на рис. 1.

В общем случае для функционирования исследуемого ЭМ требуется источник электропитания, а также, возможно, некоторые дополнительные устройства, к которым следует отнести генераторы сигналов, нагрузки, имитаторы различных блоков. Перечисленные устройства должны обеспечить штатный режим работы ЭМ, соответствующий планируемым условиям эксплуатации в составе электронного устройства.

Необходимость и состав устройств обеспечения функционирования ЭМ выбирается для каждого случая индивидуально и может быть весьма сложным, например, при необходимости формирования стандартных протоколов цифровой передачи данных.

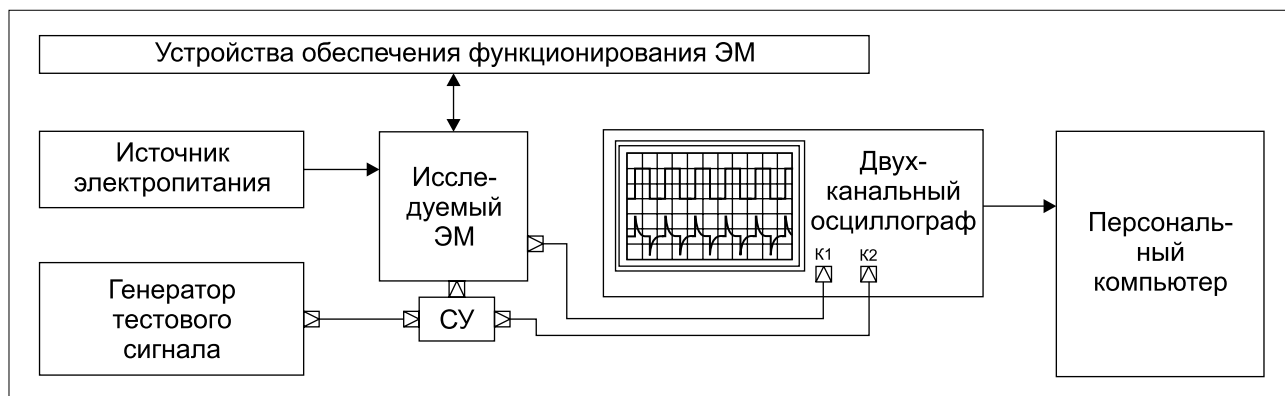
На значение конкретной ДХ оказывают влияние температура окружающей среды и напряжение электропитания ЭМ, что необходимо учитывать при выборе условий проведения измерений.

Инициация динамических процессов в ЭМ выполняется за счет внешнего генератора тестового сигнала. Необходимая форма и характеристики тестового сигнала зависят от особенностей ЭМ. В большинстве случаев это будет периодическая импульсная последовательность или пакет импульсов.

Важным вопросом является способ подключения генератора к ЭМ. Как правило, его выходной сигнал будет широкополосным, следовательно, необходимо обеспечивать согласование со входом ЭМ, а также входом осциллографа. Если тестовый сигнал подается на стандартный вход ЭМ с волновым сопротивлением 50 Ом, то в качестве согласующего устройства (СУ) целесообразно использовать делитель мощности с рабочей полосой, включающей не менее 90% энергии тестового сигнала. Поскольку динамические характеристики измеряются во временной области, необходимо провести калибровку, результаты которой будут характеризовать временное и энергетическое расхождение сигналов на входе ЭМ и осциллографа. Это позволит уточнить результаты измерений ДХ, в т. ч. формируемый измерительной установкой временной сдвиг. Если область измеряемых ДХ лежит в наносекундном диапазоне, то для подачи тестового сигнала в ЭМ, а также для подключения средств измерений следует использовать фазостабильные кабели для уменьшения частотной дисперсии за счет разной скорости распространения на разных частотах [4].

Поскольку выходы СУ могут иметь значительную асимметрию, для точного измерения ДХ целесообразно использовать подключение осциллографа к контрольным точкам через активные пробники с рабочей полосой до нескольких гигагерц. В этом случае в измерительной системе будет обеспечен минимально возможная погрешность временной шкалы между каналами осциллографа при правильно выполненной калибровке измерительной установки. Достоинством использования активных пробников является минимизация паразитной индуктивности и возможность непосредственного подключения пробника к выбранным точкам печатного узла. Поскольку входное сопротивление, обеспечиваемое высококачественными пробниками по высокой частоте, обычно составляет порядка 1 МОм [5], проблема согласования измерительного тракта и цепей ЭМ обычно не возникает.

Статистическое исследование предполагает накопление данных о сигнале и их последующую обработку, поэтому целесообразно использовать для этих целей персональный



▲ Рис. 1. Типовая схема измерений ДХ ЭМ

компьютер. Наиболее часто используется режим удаленного управления через LAN-интерфейс, который может охватывать не только осциллограф, но и другие элементы измерительной схемы. Поскольку современные осциллографы в основном представляют собой аппаратно-программные комплексы на основе широко распространенных операционных систем, то при наличии запаса по производительности и подходящего программного обеспечения статистический анализ можно проводить непосредственно на аппаратной платформе осциллографа.

Анализируя состав схемы на рис. 1, можно заметить, что обязательными ее элементами являются осциллограф, ЭМ и — в большинстве случаев — генератор тестового сигнала, например, в случае исследования ДХ для ЭМ, являющихся пассивными устройствами. При этом генератор тестовых сигналов можно исключить из схемы только в том случае, когда генерация анализируемого сигнала ЭМ не предполагает внешней синхронизации. Прослеживается аналогия с трекинг-генераторами синусоидального сигнала, весьма часто включаемыми в качестве дополнительной опции в аппаратную часть анализаторов спектра и служащими для проведения двухпортовых измерений, в т. ч. для построения АЧХ.

Для исследования ДХ в первую очередь необходимый качественный осциллограф с широкой полосой пропускания и генератор тестовых сигналов.

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДХ

Рассмотрим особенности ДХ ЭМ как объекта статистического исследования. ДХ ЭМ могут являть собой одномерные или многомерные случайные величины [6], измеряемые для разных ЭМ в одних и тех же условиях. В качестве многомерной случайной величины можно рассматривать, например, фронт сигнала, отсчитывая его функцию от некоторого времени — точки синхронизации. Очевидно, что в данном примере каждый отсчет для разных ЭМ и для фиксированного по отношению к точке синхронизации момента времени будет являть собой одномерную случайную величину. Более того, соседние отсчеты такой случайной величины будут независимыми, и это обстоятельство определяет возможность сведения многомерного статистического исследования к одномерному. Поэтому далее рассмотрим именно такой вид анализа.

Как отмечалось выше, ДХ следует разделять на качественные и численные. Для качественных ДХ статистический анализ не может быть проведен по представленному ниже алгоритму,

однако должен выполняться с использованием той же измерительной схемы. Статистикой качественной ДХ будет являться накопленная частота появления [7], измеряемая как доля успешных реализаций события, соответствующего такой ДХ.

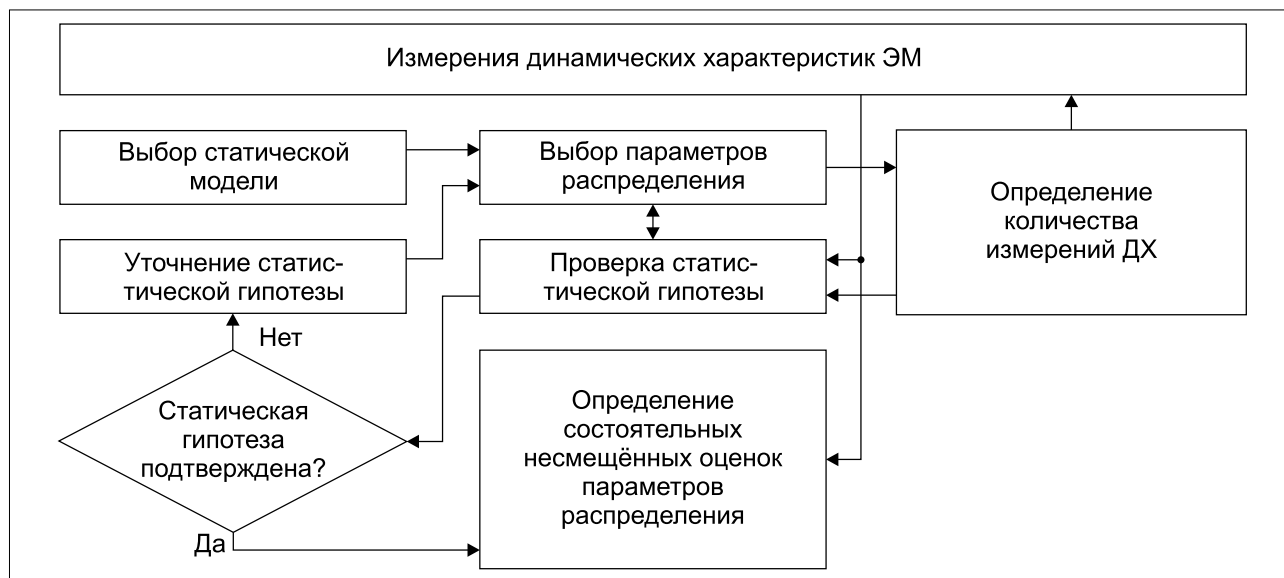
Статистическое исследование ДХ ЭМ будет сведено к получению ответа на вопросы о принадлежности отдельно измеренной случайной величины к тому или иному виду статистического распределения и о значении параметров этого распределения. Схема алгоритма выполнения статистического исследования приведена на рис. 2.

Статистическое исследование должно начинаться с выбора статистической модели, описывающей, как предполагается, случайный характер выбранной ДХ. Под статической моделью понимается тип распределения, описываемый некоторым набором параметров. Рассматривая однотипные ЭМ, можно сделать вывод, что различия в значениях ДХ обусловлены разбросом характеристик элементной базы. Многочисленные исследования показали [8], что они определяются множеством случайных факторов, не зависящих друг от друга. По этой причине считается, что они имеют нормальное распределение, следовательно, такой же характер распределения будет сохраняться для ДХ в большинстве случаев.

Параметры распределения однозначно определяются выбранной статистической гипотезой. Далее следует определить необходимое количество измерений ДХ. Ясно, что чем большее количество измерений ДХ будет проведено, тем более точные результаты даст проводимое статистическое исследование, но в то же время для них потребуется больше времени и большее количество образцов ЭМ. На практике необходимое количество измерений ДХ будет определяться требуемой точностью оценки параметров распределения, а фактически возможное — имеющимся количеством образцов ЭМ.

Для определения оптимального количества измерений целесообразно обратиться к метрологической практике. При измерении некоторой величины считается [9], что для получения состоятельной оценки ее математического ожидания необходимо провести 5–10 измерений. Но статистическое исследование ДХ ЭМ предполагает не только определение параметров распределения, но и проверку статистических гипотез. Для достижения уровня достоверности, приемлемого для практики, целесообразно проводить не менее 20 измерений.

Проверка статистической гипотезы может выполняться разными методами. Для нормального распределения возможно использование относительных частот [7], т. е. построение функции плотности предполагаемого распределения в виде



▲ Рис. 2. Схема алгоритма статистического исследования ДХ ЭМ

гистограммы. Для использования такого метода необходимо использовать разбиение нормального распределения не менее чем на 10 интервалов, общее количество измеренных значений ДХ должно составлять не менее 60.

Совокупность измеренных значений ДХ в количестве N , кратном двум, разделяют на две группы без какого-либо упорядочивания. Далее для одной такой группы рассчитывается выборочное среднее \bar{x}_v и выборочная стандартная дисперсия $\overline{(x - \bar{x}_v)^2}$ по формулам:

$$\bar{x}_v = \frac{2}{N} \sum_{l=1}^{N/2} x_l; \quad \overline{(x - \bar{x}_v)^2} = \frac{2}{N} \sum_{l=1}^{N/2} (x_l - \bar{x}_v)^2, \quad (1)$$

где l — номер группы и элемента в группе. Рассчитанные для данной группы \bar{x}_v и $\overline{(x - \bar{x}_v)^2}$ используют в качестве параметров распределения, и по ним строят кривую функции плотности распределения. Далее, используя измеренные значения ДХ ЭМ из второй группы, строят наложенную на этот график гистограмму относительных частот (дискретную функцию плотности распределения) и соотносят их друг с другом. Гипотеза считается подтвержденной, если расхождение между ними составит менее заданного. В противном случае выбирают и отбрасывают новую статистическую гипотезу.

Если статистическая гипотеза подтверждена, то окончательные значения несмещенных оценок параметров распределения определяют по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{z=1}^N x_z; \quad \overline{(x - \bar{x})^2} = \frac{1}{N-1} \sum_{z=1}^N (x_z - \bar{x})^2, \quad (2)$$

где x_z — измеренные значения ДХ ЭМ. На основе результатов статистического исследования ДХ ЭМ определяются их номинальные значения и границы допуска, что позволяет формировать обоснованные выводы о возможности проявления проблем целостности сигналов в проектируемом устройстве. Важно еще раз подчеркнуть, что статистические вычисления могут быть выполнены на аппаратной платформе осциллографа, участвующего в измерениях, при условии наличия подходящего программного обеспечения.

ТРЕБОВАНИЯ К ОСЦИЛЛОГРАФУ, ИСПОЛЪЗУЕМОМУ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассмотрев схему измерений ДХ ЭМ, можно выявить следующие требования к осциллографу как ее важнейшему элементу. Для обеспечения универсальности осциллографа и точности результатов измерений первостепенное значение имеет чувствительность по входу, или минимальное разрешение по вертикали. Поскольку обработка данных сигналов обычно проводится в цифровом формате, то в режиме с минимальной чувствительностью должно обеспечиваться отображение осциллограмм, не искаженное результатами малоразрядного квантования по уровню. Таким образом, разрядность АЦП должна быть заведомо больше 8 бит — стандартного значения для большинства осциллографов среднего класса.

Поскольку анализу подвергаются динамические характеристики, осциллограф должен иметь широкую рабочую полосу частот, по крайней мере в 5–10 раз превосходящую характерные частоты следования импульсов в измерительной системе, что необходимо для исключения произвольной фильтрации сигналов входными каскадами осциллографического тракта.

Если осциллограф, используемый в схеме на рис. 1, обладает высокой скоростью захвата, то это позволяет проводить статистическое исследование не только для группы однотипных ЭМ, но и для каждого образца в отдельности. В частности, таким образом может быть оценено влияние колебаний напряжения

питания ЭМ на значения ДХ. Следовательно, высокая скорость захвата наряду с достаточным для хранения осциллограмм объемом памяти является весьма желательным свойством осциллографа при исследовании ДХ ЭМ.

В случае больших объемов измерений (входной контроль, поточное производство и т. п.) средства измерений должны обладать высокой надежностью. Это, казалось бы, общераспространенное требование для отмеченных применений играет более важную роль, чем в других случаях, что объясняется значительными масштабами возможного ущерба в случае допуска в производство ЭМ с недопустимыми значениями ДХ.

Для сокращения стоимости измерительной установки и улучшения эргономики целесообразно включение в состав осциллографа отдельной аппаратной опции — генератора, который должен обеспечивать формирование тестовых сигналов с заданными параметрами. Как правило, для измерения ДХ ЭМ необходимы импульсные сигналы с достаточно крутыми фронтами.

Многие осциллографы снабжаются генераторами калибровочных сигналов для пробников. Такие генераторы формируют последовательность прямоугольных импульсов с фиксированной частотой порядка 1–10 кГц и постоянной с амплитудой на уровне 1 В. В целях измерения ДХ ЭМ их использование сильно ограничено. Встроенный генератор должен иметь широкие пределы изменения параметров формируемых сигналов.

Рассмотрим в качестве примера подходящих для измерений ДХ ЭМ средств осциллографа R&S серии RTB 2000, свойства которых во многом отвечают перечисленным требованиям.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОСЦИЛЛОГРАФОВ R&S RTB 2000

Осциллографы R&S RTB 2000 (рис. 3) позиционируются в первую очередь как приборы для оснащения учебных лабораторий, имеющие ряд дополнительных функций [10]. Их рабочая полоса составляет до 300 МГц, имеется 2 или 4 канала в зависимости от модификации. Объем памяти составляет 10 млн отсчетов на канал (20 млн в режиме чередования), скорость захвата — до 50 тыс. осциллограмм в секунду.



▲ Рис. 3. Внешний вид осциллографа R&S RTB 2000

Минимальное разрешение по амплитуде составляет 1 мВ/дел. при разрядности АЦП 10 бит, что позволяет качественно воспроизводить детали переходных процессов. Осциллографы данной серии обеспечивают 1,25 млрд/с отсчетов на канал (2,5 млрд/с при объединении). Длительность временной развертки составляет от 1 нс/дел. до 500 с/дел., т. е. прибор обеспечивает отображение практически всех значимых динамических явлений за исключением случаев, когда их характерная длительность составляет менее 10 нс.

Генератор сигналов ARB, реализованный в осциллографе, позволяет формировать синусоидальные, шумоподобные, пилообразные сигналы и, что важнее для измерений ДХ ЭМ, прямоугольные и импульсные сигналы. Имеется возможность

формирования сигналов произвольной формы и четырехбитовых последовательностей. Генератор способен формировать сигналы с амплитудой до 5 В на основе 14-битного цифроаналогового преобразования с частотой дискретизации 250 млн отсчетов/с. Возможно введение постоянной составляющей на уровне $\pm 2,5$ В. Частота следования прямоугольных импульсов выбирается в интервале от 0,1 Гц до 10 МГц. Такие характеристики генератора позволяют использовать его в большинстве измерений ДХ ЭМ, и, как отмечалось выше, значительно упростить измерительную установку и снизить ее стоимость.

У осциллографов R&S RTB имеется возможность работы в режиме 16-канального логического анализатора, что может быть использовано для измерений ДХ ЭМ некоторых типов. Использование логического анализатора позволяет проводить групповую оценку сигналов, в т. ч. поступающих от разных ЭМ, для ускорения набора статистики при анализе цифровых сигналов, если не требуется детальное исследование их формы.

Осциллографы R&S RTB 2000 — удобное средство измерений ДХ ЭМ, снабженное встроенным генератором тестовых сигналов. Для ЭМ с простой функциональностью измерения могут быть проведены с использованием единственного прибора и необходимой оснастки. Наличие четырех выходов у встроенного генератора сигналов дает возможность отказаться от использования дополнительных устройств обеспечения функционирования для некоторых типов ЭМ, что упрощает схему измерений и ускоряет их проведение. Уступая некоторым сериям осциллографов по рабочей полосе и некоторым другим характеристикам, R&S RTB 2000 имеют достоинства, определяющие возможность качественного и быстрого решения задачи статистического исследования ДХ ЭМ.

ВЫВОДЫ

Принятый многими фирмами принцип проектирования электронных устройств, состоящий в системной интеграции модульных решений, должен подразумевать обоснованный выбор типов ЭМ, в т. ч. на основе анализа их динамических ха-

рактеристик. Усложнение функциональности ЭМ, а также спектрального состава используемых сигналов приводит к необходимости контроля ДХ ЭМ, стабильность которых во многом определяет надежность работы электронных устройств и отсутствие проблем целостности сигналов.

Исследование ДХ ЭМ отличается от многих других измерительных задач в области радиоэлектроники необходимостью сбора статистики с целью расчета характеристик распределения ДХ, определения границ их возможного разброса. Важность таких исследований предъявляет особые требования к средствам измерений, в первую очередь, к осциллографам. Одним из приборов, удачно включающих в себя опцию генератора сигналов, являются осциллографы R&S серии RTB 2000, которые можно рекомендовать для решения рассмотренной задачи. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Хоровиц П., Хилл У. *Искусство схемотехники*. Т. 1. Пер. с англ. под ред. Гальперина М. В. М.: Мир, 1986.
2. Баскаков С. И. *Радиотехнические цепи и сигналы*. Учебное пособие для ВУЗов. М.: Высшая школа, 2003.
3. Уильямс Т. *ЭМС для разработчиков продукции*. Пер. с англ. Кармашева В. С., Кечиева Л. Н. М.: Издательский дом «Технологии», 2003.
4. Григорьев А. Д., Иванов В. А., Молоковский С. И. *Микроволновая электроника*. М.: Лань, 2016.
5. https://www.rohde-schwarz.com/product/rtzp03-productstartpage_63493-164290.html.
6. Большаков А. А., Каримов Р. Н. *Методы обработки многомерных данных и временных рядов*. М.: Горячая линия/Телеком, 2007.
7. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М.: «Наука», 1968.
8. Рычина Т. А. *Электрорадиоэлементы*. М.: Советское радио, 1976.
9. Гмурман В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика*. М.: Высшая школа, 2003.
10. https://www.rohde-schwarz.com/product/rtb2000-productstartpage_63493-266306.html.