

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПО КОНДУКТИВНЫМ ПОМЕХАМ ЗОНДОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

к.т.н. ¹Минченко В.А., проф. ²Карпович С.Е., доц. ²Дик С.К., ²Кекиш Н.И.
¹ОАО «Планар», Минск
²УО «Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники», Минск

Введение. Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) является актуальной, сложной и межотраслевой, так как затрагивает интересы всех отраслей промышленности, науки и экологии [1, 2].

Наряду с улучшением точностных параметров специального технологического оборудования (СТО) для микро- и нанoeлектроники, в том числе зондового оборудования, весьма актуально повышение его надежности в части помехозащищенности по кондуктивным помехам: емкостным, индуктивным связям, общим шинам, системе заземления, печатным проводникам и проводам. Наибольшее влияние на помехозащищенность технических средств (ТС) оказывают импульсные помехи, как правило, имеющие достаточно большую амплитуду и малые фронты импульсов, от единиц до десятков наносекунд. В соответствии с Директивой ЕЭС, электронное оборудование и приборы должны подвергаться обязательной сертификации. Для этого на ряде зарубежных фирм (Schaffner, Швейцария; Dranetz, США; Noise Laboratory Co LTD, Япония и др.) имеется аппаратура для испытаний ТС на электромагнитную совместимость (ЭМС) по кондуктивным помехам. Поэтому проблема испытаний ТС на электромагнитную совместимость весьма актуальна, не только для Беларуси, но и для всего Таможенного Союза.

Для создания комплекта приборов для испытаний ТС по кондуктивным помехам, необходимо решать ряд научно-технических проблем, включая разработку принципов построения, структурных и принципиальных схем и проведение исследований имитаторов (ИП), генераторов электростатических разрядов (ГЭСР с воздушным, ГЭСР-К с контактным разрядом), регистраторов (РП) и измерителей помех (ИПП), а также генерирование необходимых испытательных сигналов заданной формы с нормированными параметрами в микро- нано- и пикосекундном диапазонах (до 0,7 нс), причем испытательные сигналы имеют амплитуду до 10 кВ.

Кроме того, должны быть разработаны имитаторы длительных помех, создающие провалы, перенапряжения и отключения, пропорциональные длительности периода сети (20 мс), для проверки устойчивости памяти электронных устройств к изменению напряжения сети. Ниже представлены принципы реализации представленной выше проблемы.

Принцип построения и комплект аппаратуры. Одним из основных принципов построения ИП является принцип, основанный на заряде и разряде накопительного элемента в качестве которого используется длинная линия (ДЛ) длиной l , в качестве разрядного ключа (коммутатора) – элетромеханическое реле, тиратроны, быстродействующие тиристоры, управляемые и неуправляемые разрядники и др. Простейший тип ИП содержит ДЛ с волновым сопротивлением ρ , заря-

жаемую через большое сопротивление R_3 ($R_3 \gg \rho$) до напряжения E_n и коммутатор, периодически соединяющий ДЛ с нагрузкой R_n . В случае, если сопротивление коммутатора равно нулю и $R_n = \rho$ на R_n возникает импульс тока амплитудой $E_n / 2$ и длительностью (при скорости распространения сигнала V) $t = 2l/V$ (для ИП с накопительной емкостью $t = 0,7 R_n C$). Наилучшей стабильностью выходных сигналов обладает ИП, использующий управляемый газовый разрядник и тиристорные многокаскадные формирователи помех с бегущей волной напряжения и тока. Как правило, ИП имеют форму близкую к экспоненциальной (ИП подключаются к сети переменного тока через развязывающее устройство). Лучшую форму имеет так называемый самосогласованный ИП. Имитаторы помех, использующие коммутаторы в виде реле или тиратронов, вырабатывают сигналы длительностью соответственно 10-20 нс и 30-50 нс (длительность фронта ИП зависит от типа формирующего элемента).

Принцип действия ГЭСР основан на заряде накопительной емкости напряжением 1-15 кВ и последующем разряде через электрод (выполненный в виде шара) на корпус испытуемого оборудования. Основными узлами ГЭСР являются: регулируемый источник высокого напряжения, накопительный конденсатор, разрядник-шар диаметром 8 мм (закрепленный на ручке из диэлектрика), зарядно-разрядные резисторы, разрядный блок нагрузки 2 Ом из безындукционных резисторов. Конструктивно ГЭСР выполнен в виде пистолета, заканчивающегося разрядным шариком.

Принцип действия ГЭСР-К основан на заряде от высоковольтного источника питания емкости заданного значения и разряда с известной постоянной времени через ртутное реле. ГЭСР-К имеет режим получения однократного импульса и режим генерации с частотой 20 Гц для определения метрологических характеристик.

Разработаны цифровые многоканальные измерители параметров помех и регистраторы помех [2].

Методы измерений при метрологической аттестации. Микро- нано- и пикосекундный диапазон сигналов и высокое напряжение (несколько киловольт) аппаратуры испытаний электронного оборудования и изделий микроэлектроники на электромагнитную совместимость (АИ ЭМС) и отсутствие необходимой по полосе пропускания измерительной аппаратуры потребовали поиска методов, методик и средств измерений с помощью которых возможно с приемлемой погрешностью оценить метрологические характеристики разработанной аппаратуры как специальных средств измерений.

Основными методами измерения параметров ИП, ГЭСР, РП и ИПП являются осциллографический, неосциллографический, с использованием специализированных измерителей и цифровой, с использованием импульсных вольтметров. Анализ методов и средств измерения параметров АИ ЭМС показывает, что каждый из указанных методов имеет недостатки, в том числе и значительную погрешность измерения (до $\pm 20\%$). Поэтому необходима разработка специальных методик, с помощью которых можно уменьшить суммарную погрешность измерения параметров АИ ЭМС за счет уменьшения ряда составляющих погрешностей, оптимального использования средств измерений, а также аттестации ряда широкополосных узлов и разработке специальных методик и программ аттестации АИ ЭМС. В основе указанных методик положены следующие предложенные методы измерений АИ ЭМС:

– метод прямого измерения параметров ИП, РП, ИПП с использованием аттестованного с помощью импульсного калибратора В1-5 и калибратора напряжения В1-12 высокоомного делителя (аттенюатора) и осциллографа с повышенным допустимым входным напряжением и временем нарастания переходной характеристики $t = 5-10$ нс (для аттестации ИП с $t_{\phi} = 30-50$ нс);

– метод прямого измерения с использованием комплекта широкополосных 50-омных аттенюаторов типа Д2 (50 дБ) и специального осциллографа С9-4А ($t_{\text{н}} = 0,7$ нс), используемого в режиме подачи измеряемого сигнала непосредственно на трубку осциллографа. Для обеспечения временного сдвига используется линия задержки ЛЗ-05 от осциллографа С1-70 или генератор Г5-54 (метод используется для измерения в 50-омных трактах одиночных и редкоповторяющихся сигналов от имитаторов помех, с длительностью фронта $t_{\phi} = 3-15$ нс);

– метод косвенного измерения (с расчетом коэффициента передачи канала) путем калибровки измерительного канала с помощью прецизионного генератора Г5-60 и использования широкополосного (350 МГц) осциллографа С1-108 со встроенным цифровым измерителем амплитудных и временных параметров ($\delta = \pm 1\%$), уменьшающим субъективную ошибку оператора (метод используется для аттестации ИП с $t_{\phi} = 5-15$ нс и исключает аттестацию аттенюаторов); метод косвенного измерения разрядного тока (30 А) ГЭСР путем измерения импульсного напряжения с последующим расчетом значения разрядного тока;

– дифференциальный метод для определения параметров регистраторов импульсных помех: испытательный сигнал формируется путем смещения в соединительном щите сетевого напряжения, подаваемого от эквивалента сети (типа NNB-101) и импульсного напряжения амплитудой 600-1000 В от имитатора помех ИП-1; оба напряжения подаются на входы осциллографа С1-70 (1У13, $K = 20$ В/дел), после вычитания напряжения сети из испытательного сигнала измеряются параметры помех (указанные измерения недостижимы другими методами и обеспечивают измерение параметров импульсных параметров при наличии сетевого напряжения);

– компенсационный метод для точного измерения амплитуды и выброса импульсов: использует калибратор В1-12, компенсационные головки и двухканальный осциллограф, имеющий аттестованный с погрешностью $\pm 1\%$ усилитель ВО (метод используется для аттестации импульсов имитаторов помех);

– прецизионный формирователь напряжения испытательного сигнала с временем нарастания 0,5-0,6 нс, амплитудой 100-2000 В и погрешностью по амплитуде $\pm(0,1-0,2)\%$ (используется для аттестации параметров измерителей помех).

Кроме того, при аттестации проведена оценка предела основной погрешности ИП, РП, ИПП и определены ее составляющие: неисключенная систематическая и случайная составляющая погрешности.

Практическая реализация указанных методов и методик измерения ИП, РП, ИПП в виде структурных схем со всеми согласующими, переходными и вспомогательными устройствами показала, что погрешность измерения не выходит за пределы $\pm(3-5)\%$, что достаточно при МА АИ ЭМС.

Расчётная модель метрологической аттестации. Особенностью измерителей помех является возможность запоминать и накапливать информацию о форме помехи с последующим выводом ее (за определенный интервал времени), а также быстрое действие, соответствующее наносекундному диапазону.

Метрологическая аттестация АИ ЭМС может проводиться поэлементно, тогда погрешность i -го узла определяется по формуле

$$\Delta a_i = Y_0 - f(x_0), \quad (1)$$

где x_0 – калиброванный сигнал от образцового средства измерений.

Затем определяется суммарная погрешность АИ ЭМС (при условии некоррелированности погрешностей отдельных узлов).

Расчетными и экспериментальными методами проведена оценка составляющих имитаторов помех в частности систематической Δs , неисключенной систематической Δos , случайной Δc , а также предела допустимой основной погрешности Δop . Предел допустимой основной погрешности ИП

$$\Delta op = \Delta s + \sqrt{os^2 + t^2 \sigma^2 (\Delta c)}, \quad (2)$$

где $k = 1,1$, $p = 0,95$; σ – среднее квадратическое отклонение; t – коэффициент Стьюдента; Δs – погрешность меры.

Неисключенная систематическая составляющая погрешности

$$\Delta os = \sqrt{\Delta am^2 + \Delta z^2 + \Delta vo^2 + \Delta p^2} \quad (3)$$

где Δam , Δz , Δvo , Δp – соответственно погрешности, вносимые аттенуатором, из-за задержки сигнала, визуального отсчета и рассогласования измерительного тракта. Составляющие погрешности ослабления и суммарная погрешность определяется формулой

$$\Delta am = \Delta n \sqrt{\Delta o^2 + \Delta c^2 + \Delta p^2}, \quad (4)$$

где Δn – погрешность из-за нелинейности аттенуаторов; Δc – случайная составляющая погрешности аттенуатора; Δp – погрешность от рассогласования аттенуатора; Δo – погрешность образцового (эталонного) аттенуатора

С учетом всех составляющих, в том числе погрешности образцового аттенуатора $\Delta o = \pm (0,05-0,1)\%$, погрешность ослабления аттенуатора Δam составляет не более $\pm (0,5-1)\%$, а погрешность имитаторов помех по амплитуде в пределах $\pm (3-20)\%$.

Считая погрешности, вносимые каждым узлом измерителя некоррелированными можно оценить неисключенную составляющую погрешности измерителя помех с помощью следующей формулы:

$$\Delta os = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta a^2 + \Delta n^2 + \Delta \phi^2 + \Delta o^2}, \quad (5)$$

где Δy , Δa , Δn , $\Delta \phi$, Δo соответственно погрешность масштабного (согласующего) усилителя, аттенуатора, АЦП, устройства обработки информации, устройства отсчета.

Допустимая погрешность Δop измерителя с учетом систематической Δos и случайной Δc составляющих определится по формуле:

$$\Delta op = \sum_{l=1}^P \Delta s_l + k \sqrt{\sum_{i=1}^M \Delta^2 os_i + \sum_{\kappa=1}^N T_{\kappa}^2 \sigma_{\kappa}^2 (\Delta)}, \quad (6)$$

где Δs – погрешность меры или образцового средства измерения с помощью которых осуществляется аттестация измерителя; k – коэффициент, зависящий от отношения Δos и Δc (при $p = 0,95$, $k = 1,1$); σ , T – среднее квадратическое значение, коэффициент Стьюдента.

Исследования показали, что для измерителей помех $\delta_{op} = \pm (5-15)\%$ (при $t_n = 15$ нс).

Неисключенная систематическая составляющая погрешности генератора электростатических разрядов (ГЭСР) определяется по формуле

$$\Delta\sigma_s = \sqrt{\Delta u n^2 + \Delta a m^2 + \Delta^2 p + \Delta^2 o}, \quad (7)$$

где $\Delta u n, \Delta a m, \Delta p, \Delta o$ – соответственно погрешности, вносимые источником питания ГЭСР, аттенуатором, из-за рассогласования и отсчета.

Параметры сигналов имитаторов помех существенно зависят от нагрузки и схемы соединения испытательных, измерительных и согласующих устройств, используемых при испытаниях СТО на помехозащищенность. Так как испытательный сигнал при его подаче на вход оборудования (по сети питания) нагружается в первую очередь сетевым помехоподавляющим фильтром, то проведено исследование влияния его на сигнал имитаторов помех и степень подавления сигналов ИП фильтром. Подавление сетевым помехоподавляющим фильтром фирмы Gorgcom (Англия) сигнала несимметричной помехи имитатора составляет порядка 25 дБ, подавление сигнала симметричной помехи составляет 38 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов, В.В. Промышленные помехи и обеспечение надежности функционирования систем управления технологическими процессами – Измерение, контроль, автоматизация. – 1987, вып. 2 – С. 61–72.
2. Минченко, В.А., Ковальчук Г. Ф. , Школык С. Б. Принципы построения и структурные схемы зондовых автоматических систем контроля параметров изделий микро- и нанoeлектроники на пластине / В.А. Минченко, Г.Ф. Ковальчук, С.Б. Школык // Приборы и методы измерений. – № 2, 2012 – С. 67–75.
3. Онегин, Е.Е. Автоматическая сборка ИС / Е.Е. Онегин, В.А. Зенькович, Л.Г. Битно. – Минск : Выш. шк., 1990. – 382 с.
4. Карпович, С.Е. Прецизионные системы перемещений для оборудования производства изделий электронной техники / С.Е. Карпович, В.В. Жарский, И.В. Дайняк // Доклады БГУИР. – 2014. – № 2(80). – С. 60–72.
5. Дайняк, И.В. Интегрированная система многокоординатных перемещений для сборочного оборудования микроэлектроники // И.В. Дайняк, Д.Г. Бегун, В.В. Поляковский / Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2014 г. – № 11. – С. 59–64.

SUMMARY

Calculated and experimental methods of research of electromagnetic compatibility allow to increase the quality of development of devices and to guarantee output characteristics of research devices of the electronic devices for probe control.

РЕЗЮМЕ

Предложенные расчётные и экспериментальные методы исследования электромагнитной совместимости позволили повысить качество разработки аппаратуры и гарантировать выходные характеристики аппаратуры испытаний электронного оборудования для зондового контроля.

РЕФЕРАТ

УДК 621.382.088

Минченко В.А., Карпович С.Е., Дик С.К., Кекиш Н.И. Электромагнитная совместимость по кондуктивным помехам зондового технологического оборудования микро- и нанoeлектроники

Предложенные расчётные и экспериментальные методы исследования электромагнитной совместимости позволили повысить качество разработки аппаратуры и гарантировать выходные характеристики аппаратуры испытаний электронного оборудования для зондового контроля. – Библиогр. 2.

ABSTRACT

UDC 621.382.088

*Minchenko V.A., Karpovich S.E., Dick S.K., Kekish N.I. **Electromagnetic compatibility by conductive interference of probe technologic devices of the micro- and nanoelectronics***

Calculated and experimental methods of research of electromagnetic compatibility allow to increase the quality of development of devices and to guarantee output characteristics of research devices of the electronic devices for probe control. – Ref.: 2 titles.