

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

к.т.н. <sup>1</sup>Минченко В.А., проф. <sup>2</sup>Карпович С.Е., доц. <sup>2</sup>Дик С.К., <sup>2</sup>Кекиш Н.И.

<sup>1</sup>ОАО «Планар», Минск

<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники», Минск

**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  $\rho$ , заряжаемую 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 ( $t_n = 0,7$  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 быстродействие, 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  $\Delta s$ , неисключенной систематической  $\Delta os$ , случайной  $\Delta c$ , а также предела допустимой основной погрешности  $\Delta op$ . Предел допустимой основной погрешности ИП

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

где  $k = 1,1$ ,  $p = 0,95$ ;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;  $t$  – коэффициент Стьюдента;  $\Delta s$  – погрешность меры.

Неисключенная систематическая составляющая погрешности

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

где  $\Delta am$ ,  $\Delta z$ ,  $\Delta vo$ ,  $\Delta p$  – соответственно погрешности, вносимые аттенуатором, из-за задержки сигнала, визуального отсчета и рассогласования измерительного тракта Составляющие погрешности ослабления и суммарная погрешность определяется формулой

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

где  $\Delta n$  – погрешность из-за нелинейности аттенуаторов;  $\Delta c$  – случайная составляющая погрешности аттенуатора;  $\Delta p$  – погрешность от рассогласования аттенуатора;  $\Delta o$  – погрешность образцового (эталонного) аттенуатора

С учетом всех составляющих, в том числе погрешности образцового аттенуатора  $\Delta o = \pm(0,05-0,1)\%$ , погрешность ослабления аттенуатора  $\Delta am$  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:

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

где  $\Delta y$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta n$ ,  $\Delta \phi$ ,  $\Delta o$  соответственно погрешность масштабного (согласующего) усилителя, аттенуатора, АЦП, устройства обработки информации, устройства отсчета.

Допустимая погрешность  $\Delta op$  измерителя с учетом систематической  $\Delta os$  и случайной  $\Delta c$  составляющих определится по формуле:

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

где  $\Delta s$  – погрешность меры или образцового средства измерения с помощью которых осуществляется аттестация измерителя;  $k$  – коэффициент, зависящий от соотношения  $\Delta os$  и  $\Delta c$  ( при  $p = 0,95, k = 1,1$  );  $\sigma, T$  – 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

$$\Delta os = \sqrt{\Delta un^2 + \Delta at^2 + \Delta^2 p + \Delta^2 o}, \quad (7)$$

где  $\Delta un, \Delta at, \Delta p, \Delta o$  – 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 Gorgom (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.