

## Перспективы использования моделей измерительных приемников в формах, отличных от схемной

Лемешко Н.В. (к.т.н., доцент каф. РТУиС МИЭМ НИУ ВШЭ, [nlem83@mail.ru](mailto:nlem83@mail.ru))

**Ключевые слова:** измерительный приемник, модель, цифровая обработка сигналов, цифровой фильтр, формальная математическая модель, дифференциальное уравнение, система автоматизации проектирования.

*В статье рассматриваются основы построения моделей измерительных приемников, предназначенных для виртуальных исследований в области ЭМС, в формах, отличных от схемных. Анализируются модели на основе цифровой обработки сигналов, формальные математические модели, а также базирующиеся на графическом программировании. В завершение статьи делается общий вывод о перспективах использования таких моделей при построении системы автоматизированного проектирования, реализующей процедуру виртуальной сертификации радиоэлектронных средств по показателям эмиссии излучаемых радиопомех.*

### Введение

На сегодняшний день проблема обеспечения электромагнитной обстановки, приемлемой для работы радиоэлектронных средств (РЭС), решается следующим образом. После завершения стадий проектирования и конструирования, на которых принимается ряд мер по снижению помехоэмиссии и обеспечению помехоустойчивости, создается опытный образец, который подвергается аттестационным испытаниям. Порядок, условия и средства проведения таких исследований определяются действующими государственными стандартами.

В работах [1, 2] было предложено перевести исследования помехоэмиссии в плоскость моделирования. Для этого была предложена концепция виртуальной сертификации, сущность которой состоит в том, что оценка уровня помехоэмиссии выполняется на основе моделирования процедуры сертификационных испытаний. Для его проведения должны быть построены модели средств измерений, условий их проведения, а также излучающего РЭС. Первый вопрос, решенный в области виртуальной сертификации, состоял в разработке моделей измерительного приемника (ИП) с разными типами детекторов. Такие модели были построены и успешно прошли тестирование на проверку выполнения условий абсолютной и относительной калибровки [3 — 5]. Таким образом, было подтверждено их соответствие стандартам [6, 7], устанавливающим требования к измерительным средствам, используемым при исследованиях радиопомех.

При разработке моделей ИП была использована схема, построенная по принципу супергетеродинного приемника, в которую вошли преселектор, смеситель, объединенный с гетеродином, фильтр промежуточной частоты, детектор и динамический эквивалент индикаторного прибора. Далее каждый из этих узлов был отработан в отдельности для обеспечения нормального функционирования модели в целом. Таким образом, модели ИП исходно разрабатывались в схемном представлении, и предназначены для использования в системах схемотехнического моделирования.

Однако разработка моделей ИП в схемной форме не отменяет возможности других принципов и форм их построения. Стандарты [6, 7] регламентируют только требования к функциональности, не устанавливая принципы построения ИП, поэтому для них следует рассмотреть и другие варианты моделей.

В качестве форм представления моделей ИП в отличном от схемного виде представляется целесообразно рассмотреть:

- модели, построенные на основе цифровой обработки сигналов (ЦОС);
- формальные математические модели ИП;
- модели, основанные на графическом программировании, реализованном в специальных системах автоматизации.

Аналізу перечисленных типов и форм представления моделей ИП, а также выявлению перспектив их использования при решении практических задач и посвящена данная работа.

### **Модели измерительных приемников на основе цифровой обработки сигналов**

Изначально сигнал, поступающий на вход ИП, является непрерывным как по уровню, так и по времени. Общий принцип выполнения ЦОС состоит в том, что сигнал обрабатывается в форме двоичного кода. Для перехода к такому представлению спектр исходного сигнала ограничивается при помощи низкочастотного фильтра. Это позволяет использовать фиксированную частоту дискретизации и предотвратить наложения в спектре цифрового сигнала [8]. После этого перевод в двоичное представление выполняется с использованием аналого-цифрового преобразования, для чего формируется массив отсчетов, взятых с частотой не менее удвоенной конечной частоты спектра. Далее этот массив квантуется с округлением до некоторых уровней, каждому из которых присвоено свое двоичное число.

Поскольку объем данных, получаемых непосредственно при выборке и квантовании входного сигнала ИП после фильтрации, очень велик, то для упрощения обработки сигналов с использованием преобразования Фурье, целесообразно ввести предварительный перенос по частоте, аналогичный гетеродинному расщеплению спектра. В этом случае после ограничивающей спектр фильтрации входной сигнал должен быть умножен на синусоидальный для расщепления исследуемого спектра и переноса на промежуточную частоту. Далее путем фильтрации подавляются высокочастотные составляющие спектра, и только после этого выполняется дискретизация и квантование по уровням.

После представления сигнала в двоичном виде для оценки спектральных составляющих используется дискретное либо быстрое преобразование Фурье, если необходимо решить задачу спектрального анализа. Однако задача оценки уровня помех измерительным приемником с выбранным типом детектора отличается от функции анализатора спектра за счет дополнительного нелинейного взвешивания и фиксированной полосы пропускания на промежуточной частоте. Поэтому для моделирования функций ИП на основе ЦОС следует использовать цифровой полосовой фильтр, удовлетворяющий требованиям [6, 7] по избирательности, который может быть синтезирован на основе теории Z-преобразования [9]. В частности, функция полосового фильтра промежуточной частоты может быть реализована применением фильтров высоких и низких частот. Если использовать оцифровку входного сигнала без понижения частоты дискретизации, то в схеме цифровой обработки используется два таких фильтра, один из которых будет перестраиваемым.

Детектирование цифрового сигнала промежуточной частоты также можно рассматривать как фильтрацию, однако необходимо учесть его нелинейный характер, вызванный наличием в схеме пары элементов с диодной функцией [10]. При ЦОС они могут описываться системой логических и математических функций [9], представленных в соответствующей форме.

Индикаторный прибор, имеющий наиболее важное значение для формирования передаточной характеристики ИП с квазипиковым детектором, описывается неоднородным дифференциальным уравнением [11], которое можно трактовать как относящееся к фильтру нижних частот второго порядка. Для его реализации в модели ИП рассматриваемого типа также следует использовать цифровую фильтрацию.

Завершающей стадией ЦОС будет являться перевод показаний ИП по модели из дискретного цифрового вида в аналоговый. Он осуществляется с использованием цифро-аналогового преобразования, которое можно выполнить, например, при помощи ступенчатых функций. Поскольку скачки приводят к существенному расширению спектра, то для восстановления плавной формы выходного сигнала (показания ИП) как функции времени следует использовать сглаживающий низкочастотный фильтр.

Используемые в описанной последовательности преобразований фильтры высокой и низкой частоты для сигналов в аналоговой форме могут быть реализованы в виде электрических схем либо соответствующих им дифференциальных уравнений. Если рассматривать реализацию самого процесса моделирования, то его следует проводить в средах, обеспечивающих симуляцию для смешанных аналоговых и цифровых сигналов. Примером таких программных пакетов является система OrCAD [12].

### **Формальные математические модели измерительных приемников**

Понятие математической модели вводится в теории автоматизации проектирования. Согласно [13], математическая модель представляет собой совокупность переменных, скалярных и векторных величин и соотношений между ними, которые в совокупности описывают некоторое явление или процесс. В случае ИП таким процессом является формирование показания ИП по модели путем последовательных преобразований входного сигнала.

Переход к математической модели ИП может быть осуществлен, например, по схеме его замещения. Такой переход выполняется на основе компонентных уравнений, описывающих свойства элементов модели. В составе полной схемной модели ИП присутствуют фильтры преселектора и промежуточной частоты, построенные в виде колебательных контуров с индуктивной связью, смеситель в форме управляемого источника напряжения, а также детекторные RC-цепи и схема, моделирующая динамику подвижной системы индикаторного прибора [3]. Поэтому в наиболее простом случае математическая модель ИП во временной области будет состоять из двух систем дифференциальных уравнений, описывающих фильтры, уравнений, описывающих детекторную цепь и динамику движения стрелки индикаторного прибора [11], а также функции, задающей частотное преобразование в гетеродине.

Описание детекторов пикового, квазипикового, среднего и среднеквадратичного значений должно содержать условия, задающие циклы заряда и разряда детекторной цепи при большем и меньшем уровне входного напряжения по отношению к напряжению на емкости детектора [10]. Для каждого из отмеченных режимов напряжение на емкости детектора может быть найдено из решения уравнений, непосредственно вытекающих из схем замещения детекторов. Предложенная в [14] модель фильтра промежуточной частоты, построенного по двухкаскадной схеме, в математической форме строится объединением уравнений, описывающих каждый компонент в отдельности, которое выполняется с использованием законов Кирхгофа.

При разработке методов снижения длительности моделирования ИП при помощи перехода к моделям с более простой структурой было введено три их типа — упрощенные, диапазонные и полностью конфигурируемые [15]. Результат перехода к формальному математическому представлению для них будет несколько отличаться на качественном уровне. Упрощенные модели, характеризующиеся наиболее простой структурой, состоят из элементов с номиналами, не изменяющимися в ходе моделирования, поэтому они будут описываться дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

Для диапазонных моделей варьируемым непосредственно при моделировании параметром является частота настройки ИП, от которой зависит расположение полосы пропускания преселектора в частотном диапазоне, для которого построена модель. Изменение частоты настройки в соответствии с теорией параметрических моделей [16]

приводит к варьированию коэффициентов в дифференциальных уравнениях, построенных для моделей с жесткой структурой. Таким образом, система ДУ, описывающая преселектор ИП, становится нестационарной. Если рассматривать полностью конфигурируемые модели ИП, то для них помимо частоты настройки возможно изменение и других параметров, характеризующих свойства любого из перечисленных выше узлов модели.

В работе [17] было сформировано представление о едином пространстве сигналов для комплексного моделирования радиоэлектронных средств, основанное на математической общности описания разнородных физических процессов. В частности, там было предложено использовать фазовые переменные для введения в модель управляющих воздействий в ходе моделирования. Для расчета значений номиналов элементов, соответствующих текущим установкам, используются цепи формирования управляющих воздействий, которые являются частью модели. Их математическое описание представляется в виде функциональных зависимостей, обычно представляемых в явном виде.

Таким образом, выполняя расчет с применением математической модели, можно получить показания ИП как функцию времени. При этом для решения всех уравнений и систем задаются нулевые начальные условия. Такие расчеты должны выполняться с использованием современных математических пакетов, например MatLAB или MathCAD [18]. Как показала практика, основные сложности, возникающие при решении подобных задач с использованием средств автоматизации, состоят в обеспечении сходимости численных методов. В частности, дифференциальные уравнения и их системы, описывающие реакцию узлов ИП на входной сигнал, могут содержать коэффициенты, характеризующиеся большим разбросом значений. В таких условиях обеспечение сходимости и получения адекватных результатов возможно только в случае, если указанный разброс будет уменьшен за счет принципов масштабирования номиналов элементов, временных и частотных характеристик, либо при существенном ограничении минимального шага по времени, что приводит к увеличению длительности расчета. Аналогичная ситуация наблюдалась при отладке схемной модели ИП с квазипиковым детектором [4].

Модель ИП в математическом виде может быть построена и для цифровой обработки сигналов. Переход от непрерывного сигнала к двоичному представлению может быть выполнен с использованием фильтра и последующей выборки значений. Обработка сигналов, включающая последовательную цифровую фильтрацию, может быть выполнена с использованием математического аппарата булевой алгебры. Обратный переход к непрерывным показаниям ИП по модели выполняется при помощи линейной интерполяции [19], далее сигнал сглаживается при помощи фильтра, описываемого обыкновенным дифференциальным уравнением. Таким образом, формальное математическое описание может быть построено как для схемной реализации, так и для случая использования ЦОС.

### **Моделирование измерительных приемников на основе графического программирования**

Графическое программирование, в отличие от символьного, подразумевает ввод информации для последующей обработки в виде блок-схем. Известной системой для графического программирования является система LabVIEW [20] компании National Instruments, предназначенная для построения виртуальных приборов и блоков обработки информации. Отмеченное применение — лишь одно из многих для системы LabView, которая одновременно является средой разработки и отладки проектов, средством программирования микроэлектронных изделий, а также графической оболочкой для взаимодействия с объектами приборной базы производства National Instruments и ряда других производителей.

Сущность графического программирования применительно к реализации моделей измерительных приемников состоит в том, что их структура для заданного принципа обработки сигналов строится в форме блок-схемы с указанием взаимосвязей ее элементов. В качестве таких элементов обычно выступают библиотечные ячейки, предназначенные для выполнения конкретных функций — аналоговой и цифровой фильтрации, усиления и т.д.

Для построения модели ИП с аналоговой или цифровой обработкой сигналов необходимо иметь точное представление о параметрах, которые должны иметь стандартные ячейки. В случае необходимости их пересчета из нормируемых значений можно использовать методики, изложенные, например, в [10, 11, 14], либо применять частные подходы. Передаточные функции блоков, составляющих модель ИП, могут задаваться в частотной либо во временной области.

Необходимо отметить также, что использование графического программирования с соответствующим интерфейсом ввода не ограничивает возможностей в части использования как аналоговых, так и цифровых принципов обработки сигналов. Схемные аналоговые модели могут быть построены как совокупность стандартных узлов аналоговой электроники, описанных в [3]; цифровой вариант модели ИП реализуется в соответствии с приведенным выше описанием на основе библиотек функций ЦОС [21].

Модели, построенные по описанному принципу в графических средах, отличаются высокой наглядностью. Например, для отображения результатов измерений в LabVIEW предусмотрено множество различных шкал, диаграмм и т.п. Управляющие воздействия можно вводить непосредственно в ячейки, изменяя, например, частоту настройки. При использовании технических средств сбора и обработки информации, предоставляемых National Instruments, возможно осуществлять анализ реальных сигналов в цифровой и аналоговой форме. При этом высокочастотная часть модели ИП может быть реализована аппаратно, что позволит упростить обработку и уменьшить поступающий в систему LabVIEW поток данных.

Таким образом, системы, подобные LabVIEW, позволяют не только реализовать модели ИП с требуемыми характеристиками, но и существенно расширить область их применения, не ограничиваясь только задачами виртуальной сертификации.

### **Заключение**

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены принципы и особенности построения моделей ИП в форме, отличной от схемной. Такие представления на текущий момент не требуют более глубокой разработки, являясь теоретической либо формальной альтернативой подробно проработанных схемных моделей измерительных приемников. Кроме того, построенных ранее схемных моделей вполне достаточно для решения практических задач, связанных с виртуальной сертификацией РЭС по уровню излучаемых радиопомех.

При программной реализации могут использоваться любые формы представления моделей ИП. Если процедура виртуальной сертификации реализуется в форме последовательного анализа излучений проводников, их трансформации в пространстве, формирования поля в месте предполагаемого расположения антенны и моделирования функций ИП, то можно предположить, что последнее будет выполняться в отдельном модуле системы автоматизации проектирования.

Модели, основанные на графическом программировании, несмотря на их удобство, наглядность и широкие возможности по конфигурированию, в данном случае не найдут применения. Это объясняется тем, что они ориентированы на конкретную среду разработки, что существенно усложнит лицензирование всей системы автоматического проектирования, а также несут массу избыточной информации, не представляющей интереса для разработчика РЭС. По этим же причинам существенно осложняется использование моделей ИП непосредственно в математической форме.

Схемные модели ИП, а также построенные на базе ЦОС, обладают высокой универсальностью в плане среды моделирования; для них хорошо развиты методы формализации, обеспечивающие переход к математическому представлению, и принципы расчета с использованием численных методов [22, 23]. Применение комбинированных типов моделей представляется не рациональным из-за необходимости использования дополнительных структур, обеспечивающих переход от дискретно-квантованного представления сигналов к непрерывному, чему сопутствует увеличение интегральной погрешности.

Использование моделей ИП на основе ЦОС может снизить длительность моделирования за счет использования рационально построенных алгоритмов обработки, лишенных избыточности. Однако в будущем, при использовании моделей ИП для решения практических задач в области ЭМС, при развитии теории виртуальной сертификации будем ориентироваться на их схемное представление [3].

### Литература

1. Кечиев Л.Н., Лемешко Н.В. Виртуальная сертификация радиоэлектронных средств радиоэлектронных средств по уровню помехоэмиссии как средство подготовки к лабораторным испытаниям по электромагнитной совместимости. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2010, №1. — с.57-70.
2. Кечиев Л.Н., Лемешко Н.В. Виртуальная сертификация радиоэлектронных средств по уровню помехоэмиссии. Постановка проблемы. — Технологии ЭМС, №2 (33) — М.: ООО Издательский дом «Технология», 2010. — с.3-15.
3. Лемешко Н.В. Разработка моделей измерительных приемников с детекторами различных типов, используемых при исследованиях в области ЭМС. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2011, №1. — с.89-98.
4. Лемешко Н.В. Особенности и результаты проведения калибровки моделей измерительных приемников с квазипиковым детектором. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2011, №1. — с.99-106.
5. Лемешко Н.В. Виртуальная калибровка моделей измерительных приемников с детекторами пикового, среднего и среднеквадратичного значений. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2011, №2. — с.70-80.
6. ГОСТ Р 51319-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний». — М.: Издательство Стандартов, 2000. — 57 с.
7. ГОСТ Р 51318.16.1.1-2007 «Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и методы измерений. Часть 1-1. Аппаратура для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. Приборы для измерения промышленных радиопомех». — М.: Стандартинформ, 2008. — 58 с.
8. Солонина А.И., Улахович Д.А., Яковлев Л.А. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. — С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2002. — 464 с.
9. Гольденберг Л.М., Матюшин Б.Д., Поляк Н.М. Цифровая обработка сигналов. Учебное пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1990. — 256 с.
10. Лемешко Н.В. Моделирование и идентификация параметров моделей детекторов измерительных приемников. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2010, №4. — с.47-62.
11. Корякин В.С., Кравчук Ю.В., Лебедева О.В. и др. Измерители радиопомех. — Под ред. Фастовского И.А. — М.: Связь, 1973. — 152 с.
12. Болотовский Ю.И., Таназлы Г.И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга. — М.: Солон-Пресс, 2009. — 200 с.
13. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. — Под ред. Алексеева О.В. — М.: Высшая школа, 2000. — 479 с.

14. Лемешко Н.В. Разработка параметрической модели частотно-избирательных цепей измерительных приемников для исследования радиопомех. — Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2010, №4. — с.27-35.
15. Лемешко Н.В. Методы сокращения длительности моделирования измерительных приемников при виртуальных исследованиях в области ЭМС. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2011, №3. — с.63-77.
16. Лемешко Н.В. Параметрические модели радиоэлектронных средств и узлов. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2010, №3. — с.73-79.
17. Лемешко Н.В. Формализация неэлектрических связей и концепция единого пространства фазовых переменных для комплексных моделей РЭС. — Труды НИИР, сборник научных статей / Под ред. Бутенко В.В. — М.: НИИР, 2010, №4. — с.36-40.
18. Дьяконов В.П. MathCAD 11/12/13 в математике. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 958 с.
19. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. // Пер. с франц. Шифрин К.С. — М.: «Наука», 1965. — 778 с.
20. Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW. — М.: ДМК Пресс, 2007. — 472 с.
21. Суранов А.Я. LabVIEW 8.20: справочник по функциям. — М.: ДМК Пресс, 2007. — 536 с.
22. Жермен-Лакур П., Жорж П.Л., Пистер Ф., Безье П. Математика и САПР. Кн. 2. — М.: Мир, 1989. — 264 с.
23. Бибило П.Н. Основы языка VHDL. — М.: Солон-Р, 2000. — 200 с.