

Форма представления погрешностей при проектировании вычислительной части интеллектуальных средств измерений

Я. Л. Шамрай

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
yago1987@yandex.ru

Аннотация. Доклад посвящен вопросам представления погрешностей в памяти ЭВМ при проектировании вычислительной части интеллектуальных средств измерений. Изложены требования к оценке погрешностей измерительных устройств. Представлено математическое описание полной погрешности и ее составляющих. Проведен анализ существующих способов организации метрологического сопровождения с учетом форм представления данных. Предложен новый подход к обработке данных погрешностей при выполнении операций над сигналом в числовой форме. Рассмотрено применение предлагаемого подхода в САПР при моделировании измерительных преобразователей.

Ключевые слова: интеллектуальные средства измерения; системы автоматизированного проектирования; метрологическое сопровождение; моделирование; погрешность; форма представления данных

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития средств электроизмерительной техники (ЭИТ) характеризуется постоянным увеличением их сложности, расширением номенклатуры измерительных блоков и устройств, входящих в прибор или систему, повышением требований к техническим и, в том числе, метрологическим параметрам. Наиболее отличительной чертой является широкое применение так называемых интеллектуальных средств измерения (ИнСИ).

Под ИнСИ сегодня понимают устройства, которые способны обрабатывать измерительный сигнал, перестраивать свои параметры, алгоритм своей работы, выполнять ряд дополнительных функций по команде с внешнего устройства или адаптивно в соответствии с меняющимися условиями [1]. Строятся такие устройства на базе программируемых микропроцессоров.

В простейшем случае микропроцессор выполняет измерительные преобразования в числовой форме, обратные по отношению к преобразованиям, выполняемым в аналоговой форме. То есть, он уже принимает непосредственное участие в получении результатов измерений [2]. Но зачастую на микропроцессор возлагаются гораздо более сложные задачи: косвенные, статистические измерения, измерения с

коррекцией, выполнение цифровой фильтрации и т.д. Реализация в ИнСИ сложных алгоритмов обработки сигналов ставит перед проектировщиками таких устройств целый ряд проблем. Аналитический расчет характеристик погрешностей результатов измерений в этом случае весьма сложен или невозможен. Экспериментальный метод определения погрешностей, основанный на использовании образцовых средств измерений, достаточно трудоемок и неэкономичен, а на этапе системотехнического проектирования ИнСИ, когда необходимо выбрать рациональную структуру измерительного средства, удовлетворяющую заданным требованиям по точности, вообще не реализуем. В такой ситуации для предварительного метрологического анализа предлагается использовать имитационное моделирование (ИМ) осуществляемых ИнСИ измерительных процедур на ЭВМ.

Под ИМ будем понимать метод математического моделирования, при котором используют прямую подстановку чисел, имитирующих внешние воздействия, параметры и переменные процессов, в математические модели процессов и аппаратуры [3].

На сегодня ИМ положено в основу многих систем автоматизированного проектирования (САПР) устройств цифровой электроники. При этом в подавляющем большинстве применяемых реализаций программного обеспечения (ПО) вопрос о влиянии конечной разрядности и форматов представления чисел в микропроцессоре не решен должным образом. В связи с этим можно говорить о низком уровне автоматизации и контроля достоверности результатов при выполнении ИМ. Настоящий доклад призван восполнить указанный пробел.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ПОГРЕШНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Прежде всего, следует отметить, что проблема конечной разрядности и форматов представления чисел характерна не только для моделируемого микропроцессорного устройства, но также для технологической ЭВМ, на которой осуществляется моделирование. Данное обстоятельство следует учитывать при разработке подсистемы ИМ в САПР ИнСИ.

Рассмотрим традиционный подход к ИМ ИнСИ [4] и обозначим критически важные задачи, требующие решения в обозначенном контексте.

Одним из первых шагов при построении имитационной модели ИнСИ является описание устройства в виде структурной схемы. Базовая структурная схема для ИнСИ с электромеханическим датчиком представлена на рис. 1.



Рис. 1. Базовая структурная схема ИнСИ с электромеханическим датчиком

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ПИП – первичный измерительный преобразователь; НП – нормирующий преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦП – цифровой процессор.

Каждому элементу устройства (измерительному преобразователю) может быть поставлен в соответствие следующий набор данных:

- оператор преобразования R_i ;
- массивы параметров α и отношений P (включают динамические характеристики, диапазон возможных значений на входе и выходе, номинальные характеристики в нормальных условиях, зависимости характеристик от условий измерения);
- множество $\{MM_{M_i}^{-}\}$ модулей, которые могут предшествовать данному (совместимы с ним).

Устройству в целом соответствует уравнение измерений, описывающее процедуру измерений и включающее операторы преобразования, введенные для каждого из элементов. Для рассматриваемого случая уравнение измерений может быть записано в виде

$$y_j^* = R_4^H R_3^H R_2^H R_1^H x_j, \quad (1)$$

В уравнении (1) приняты следующие обозначения: R_i^H – неидеальный оператор преобразования измерительного сигнала, соответствующий i -му элементу устройства; x_j – входное воздействие в j -ом измерительном эксперименте; y_j^* – результат измерения, отвечающий входному воздействию.

Для ИнСИ в целом и для каждого его элемента разрабатывается имитационная модель, представляющая собой логико-алгоритмическое описание, необходимое и достаточное для воспроизведения соответствующих

операторов измерительного преобразования на ЭВМ. После реализации имитационной модели в виде программного обеспечения может быть проведено ИМ ИнСИ.

Результатом вычислительного эксперимента на имитационной модели должно стать, прежде всего, определение погрешностей. Измерительная процедура многократно воспроизводится для нескольких модификаций уравнения измерений. Три основные модификации включают:

- уравнение измерений, учитывающее неидеальность аппаратной реализации принятого алгоритма ИнСИ, представленное соотношением (1);
- уравнение измерений, представляющее принятый алгоритм ИнСИ, которое можно получить, заменив неидеальные операторы уравнения (1), на операторы без учета неидеальности;
- уравнение измерений, также получаемое при помощи замены операторов и представляющее гипотетический алгоритм, результаты которого считаются истинными.

Применение такого подхода должно обеспечить определение методической и инструментальной погрешности, которые входят в полную группу составляющих (рис. 2).

Под методической погрешностью в данном случае будем понимать разницу результатов идеального и гипотетического алгоритмов, а под инструментальной погрешностью – разницу результатов неидеального и идеального алгоритмов.



Рис. 2. Полная группа составляющих погрешности

Допускается также рассмотрение уравнений, комбинирующих неидеальные, принятые и гипотетические операторы для исследования вклада в полную погрешность каждого из блоков ИнСИ.

Сразу оговоримся, что проверка степени адекватности входящих в уравнение (1) операторов, моделирующих конкретные измерительные преобразования, не является предметом рассмотрения в настоящем докладе. В общем случае уравнение (1) может включать линейные, нелинейные, алгебраические, дифференциальные и другие операторы [5].

Первая задача, требующая учета эффектов конечной разрядной сетки, а также используемых форматов представления чисел, возникает при попытке имитационного моделирования ИнСИ в целом. Это задача по обеспечению адекватного воспроизведения разрешающей способности для каждого отдельного элемента.

Вторая задача – обеспечение контроля ошибок округления, влияющих на корректность воспроизведения вычислительных алгоритмов. В качестве наиболее очевидного примера процедуры, где такой контроль необходим, можно указать проверку сходимости итерационных процессов. Сходимость зависит как от ограниченности разрядной сетки процессора, так и от формата представления чисел. Если эти факторы не принимаются во внимание, то результатом может стать либо преждевременное прекращение итерационного процесса, либо принципиальная невозможность достичь заданной точности даже при очень большом количестве итераций.

III. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМАТОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЧИСЕЛ

Строгая классификация погрешностей вычислительной части, необходимая для разработки требуемых средств автоматизации, приведена в работе [6].

Первый тип погрешностей – погрешности квантования или погрешности исходных данных вычислительного алгоритма как результатов выполнения аналого-цифрового преобразования измерительного сигнала. Формально такая погрешность определяется как разница между значением сигнала до АЦП и значением, полученным после АЦП, в конкретный момент времени:

$$\Delta_x v(t_i) = v_x(t_i) - v(t_i). \quad (2)$$

Погрешность квантования, определяемая соотношением (2), зависит не только от шкалы АЦП, но также от способа кодирования результата на стороне микропроцессора, т. е. формата представления чисел. Таким образом, мы можем говорить о необходимости согласования шкал АЦП и микропроцессора, а проектировщик ИнСИ обязан учесть особенности формата представления чисел для обеспечения требуемой разрешающей способности в заданном диапазоне.

Второй тип погрешностей – трансформированные погрешности, формально определяемые как разница между результатами вычислений, выполненных по заданному алгоритму L_a над исходными данными, содержащими погрешность квантования, и результатами вычислений, выполненных по тому же алгоритму над точными данными:

$$\left. \begin{aligned} L_a(v(t_i)) &= u(t_i) \\ L_a(v(t_i) + \Delta_x v(t_i)) &= u_T(t_i) = u(t_i) + \Delta_T u(t_i) \\ \Delta_T u(t_i) &= u_T(t_i) - u(t_i) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Трансформированные погрешности, определяемые соотношениями (3), характеризуют чувствительность алгоритма к вариациям входных данных.

Третий тип погрешностей – вычислительные погрешности, характеризующие суммарное влияние погрешностей округления результатов арифметических операций при выполнении вычислений по алгоритму L_a на окончательный результат вычислений. По сути, применение округления промежуточных результатов приводит к замене алгоритма L_a на алгоритм L_q .

Четвертый тип погрешностей – параметрические погрешности или погрешности квантования констант алгоритмов.

Все перечисленные типы погрешностей неразрывно связаны с разрядностью микропроцессора и форматами представления чисел, каждый из которых имеет свои особенности, что и должно быть учтено при проектировании ИнСИ и разработке ПО САПР.

Изучению самих по себе форматов представления чисел посвящено большое количество работ.

В монографии [7] проведен подробный анализ диапазона представления чисел и погрешностей представления для форматов с фиксированной и плавающей точкой.

Работа [8] содержит исчерпывающее описание формата с плавающей точкой, отвечающего стандарту IEEE 754. В частности, особо отмечен тот факт, что устройство формата делает возможной ситуацию, когда $a + b = a$ при отличных от нуля аргументах. Именно это порождает проблему отсутствия ассоциативности операций сложения и вычитания.

В работе [9] показано, что величина абсолютной погрешности представления для числа с плавающей точкой, обладающего мантиссой длины m и порядком E , определяется весом младшего бита в соответствии с выражением $\Delta = 2^{E-m+1}$. То есть данная погрешность не является постоянной на всем диапазоне представимости, зависит от порядка числа и при изменении порядка на единицу изменяется вдвое.

Автоматизированной оценке рассматриваемых типов погрешностей посвящено гораздо меньшее число работ, часть из которых уделяет внимание особенностям форматов представления чисел [10], другая же часть – полностью игнорирует [11].

Наиболее полный обзор, включающий как описание особенностей форматов на примере стандарта IEEE 754, так и предложения по организации программно-технических средств с метрологическим сопровождением (МАС), содержится в работе [12]. Критически важной для ИнСИ, а равно и для САПР ИнСИ, представляется изложенная в ней концепция реформирования информационно-вычислительной среды, подразумевающая согласование данных, алгоритма их обработки и процессорного устройства (прежде всего, разрядности) на каждом шаге вычислений. При этом

следует отметить, что большая часть приводимых в указанной работе положений относительно формата с плавающей точкой по существу дублирует сведения работ [8] и [9], излагая те же факты в несколько иной форме. Кроме того, предложенная технология в целом не содержит рекомендаций по оценке трансформированных погрешностей, что затрудняет построение законченного решения с МАС.

Поскольку ни одна из рассмотренных работ не содержит описания метода, подходящего для построения требуемых средств автоматизации, в настоящем докладе предлагается новое оригинальное решение, ориентированное на оценку трансформированных и вычислительных погрешностей, обеспечивающее контроль выполнения расчета с заданной точностью.

IV. ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ И МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ

В основу предлагаемого решения положим применение специализированного вычислительного устройства – виртуального процессора, обрабатывающего данные с плавающей точкой, представленные в специально разработанном формате. Устройство может быть реализовано в двух вариантах:

- как программная библиотека, функционирующая на базе любого стандартного процессора;
- как специализированный аппаратный процессор, подключаемый к ЭВМ дополнительно и снабженный драйвером и библиотекой, обеспечивающей интерфейс прикладного программирования.

Формат данных при программной реализации включает набор полей представленных на рис. 3.

1 байт	N байт	4 байта	4 байта	4 байта
Знак мантиссы как 1 байт	Мантисса как массив байтов	Количество байтов мантиссы как целое без знака	Порядок как целое со знаком	Порядок погрешности как целое со знаком

Рис. 3. Формат представления данных типа «число с погрешностью»

Порядок числа есть порядок старшего бита мантиссы.

Мантисса хранится как многобайтовое целое. Длина мантиссы каждого числа с плавающей точкой в предложенном формате индивидуальна и определяется в процессе обработки с учетом того, что порядок младшего бита мантиссы каждого такого числа остается постоянным и определяется настройкой чувствительности виртуального процессора. Настройка выполняется пользователем до начала вычислений. Стандартная нормализация чисел не применяется.

Таким образом, погрешность округления остается постоянной во всем диапазоне представимости «по построению», известна априорно и может быть настроена пользователем для обеспечения требуемой разрешающей способности. Кроме того, выполняется свойство ассоциативности сложения и вычитания.

Для оценки трансформированных погрешностей в формате введено поле «Порядок погрешности». Эта форма

представления является наиболее экономичной при записи. В исходных данных поле заполняется порядком погрешности квантования. В процессе вычислений значение этого поля для результата операции определяется путем сравнения аналогичных полей аргументов на базе модифицированных правил В.М. Брадиса для подсчета цифр [13]. Используются только первые четыре правила. Их модификация состоит в применении двоичной системы вместо десятичной, а также в том, что определяется не само по себе количество «сохраняемых» цифр результата, а двоичный порядок младшей из таких цифр. Именно это значение выполняет роль оценки трансформированной погрешности. При этом количество цифр, которые реально сохраняются, определяется рассмотренной выше настройкой чувствительности виртуального процессора.

Предлагаемое решение требует также разработки программных или аппаратных средств вычисления элементарных функций, аргументы и значения которых должны быть представлены в рассмотренном формате.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем докладе представлен краткий обзор проблем оценки погрешностей при проектировании ИнСИ. Предложенный автором метод, не претендуя на абсолютную строгость получаемых оценок трансформированных погрешностей, в полной мере обеспечивает решение этих проблем в ПО САПР ИнСИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Раннев Г.Г. Интеллектуальные средства измерений. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 272 с.
- [2] Методы электрических измерений: Учебное пособие для вузов / Под ред. Э.И. Цветкова. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
- [3] Цветков Э.И., Хуснутдинов Г.Н., Соболев В.С., Павлович М.И., Лубочкин М.М. Метрологический анализ процессорных измерительных средств с помощью имитационного моделирования: алгоритмы и требования к программному обеспечению // Измерения, контроль, автоматизация. 1986. №4. С. 46-54.
- [4] Цветков Э.И. Основы математической метрологии. СПб.: Политехника, 2005. 510 с.
- [5] Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений. СПб.: «СпецЛит», 1999. 240 с.
- [6] Желнов Ю.А. Точностные характеристики управляющих вычислительных машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
- [7] Шауман А.М. Основы машинной арифметики. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1979, 312 с.
- [8] Брайант Р., О'Халларон Д. Компьютерные системы: архитектура и программирование. Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1104 с.
- [9] Злобин В.К., Григорьев В.Л. Программирование арифметических операций в микропроцессорах. М.: Высшая школа, 1991. 303 с.
- [10] Гриневиц А.И. Метод оценки погрешности округлений значений вычисляемой функции, основанный на варьировании длины мантиссы в арифметике с плавающей запятой: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / МФТИ. М., 2013. 23 с.
- [11] Семенов К.К. Метрологическое сопровождение вычислений в информационно-измерительных системах : Автореф. дис. ... канд. техн. наук / СПбГПУ. СПб., 2011. 23 с.
- [12] Методологические аспекты построения моделей измерительной и числовой информации / А.С. Слюсаренко // Научная сессия ГУАП, 8-12 апреля 2019 г.: сборник докладов. Часть 1: Технические науки / СПбГУАП, СПб. С. 138-152.
- [13] Брадис В.М. Теория и практика вычислений. М.: УЧПЕДГИЗ, 1935. 280 с.