

Климентьев К.Е.
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

При создании измерительных систем одной из актуальных проблем является оценивание их метрологических характеристик на этапе проектирования, особенно в ситуации, когда нарушаются требования документа /1/, а именно:

- моделями погрешностей компонентов измерительных каналов являются случайные величины с неравномерными и негауссовскими законами распределения;
- функции преобразования (градуировочные характеристики) компонентов измерительных каналов нелинейны;
- полная погрешность измерительного канала есть результат одновременного взаимодействия составляющих различной физической природы, среди которых - основные и дополнительные составляющие инструментальной погрешности компонентов в статическом режиме, динамические погрешности компонентов, апертурные погрешности, погрешности, возникшие в результате взаимного влияния измерительных каналов и т.п.

Аналитическое оценивание метрологических характеристик в этом случае существенно затруднено и нередко приводит к неадекватным результатам. Использование же натурных экспериментов, как правило, экономически невыгодно, а на этапе проектирования просто невозможно. Для решения подобных проблем документом /1/ допускается использование методов имитационного моделирования в форме статистического эксперимента.

Итак, предположим, что на временном интервале $[0, T]$ выполняются измерения K динамически изменяющихся физических величин $X_k(t)$, $k=1..K$, $t \in [0, T]$ в номинальные моменты времени t_{ktn} , $m=1..M$. Результатом измерения являются множества $\{\tilde{X}_k(t_{kmp}), m=1..M\}$ выборочных значений приближенных числовых оценок, полученных в реальные моменты t_{kmp} завершения измерений в k -ом измерительном канале, причем в общем случае $t_{ktn} \neq t_{kmp}$.

Удобный для представления подобных систем вид метрологической модели измерительного канала предложен в работах Э. И. Цветкова, например, в /3/:

$$\tilde{X} = R_{\text{ц}} R_{\text{ащп}} R_{\text{а}} X,$$

где X - измеряемая величина; $\tilde{X}$ - оценка измеряемой величины; R_a - обобщенный оператор аналогового преобразования измерительного канала; $R_{\text{ацп}}$ - оператор аналогово-цифрового преобразования; $R_{\text{ц}}$ - обобщенный оператор цифрового преобразования измерительного канала. Эта модель может быть конкретизирована с учетом типовых метрологических моделей компонентов и временных аспектов и записана (в функциональной форме) как

$$\begin{aligned} \tilde{X}(t_n) = & f_N(f_{N-1}(\dots(f_1(X(t_{1p}) + \Delta_1(X(t_{1p}), Z_1(t_{1p}))) \cdot A_1(X(t_{1p}))) + \dots \\ & \dots + \Delta_{N-1}(X(t_{N-1p}), Z_1(t_{N-1p}))) \cdot A(X(t_{N-1p})) + \dots \\ & \dots + \Delta_N(X(t_{Np}), Z_1(t_{Np}))) \cdot A_N(X(t_{Np})) + \Delta_6(X(t_{Np})) \end{aligned} \quad (1)$$

где $i=1..N$ - номер компонента в измерительной цепи; $X(.)$ - измеряемая физическая величина (ее истинное значение), рассматриваемая как функция времени; $\tilde{X}(.)$ - оценка измеряемой величины; $Z_i(.)$ - влияющие на метрологические характеристики компонента внешние физические величины как функции времени; $f_i(.)$ - номинальные статические функции преобразования (градуировочные характеристики) отдельных компонентов измерительного канала (датчиков, усилителей, АЦП и т.п.); $\Delta_i(.)$ - погрешности (по выходу) компонентов измерительного канала как функции измеряемых и влияющих физических величин; $A_i(.)$ - числовое значение коэффициента ослабления сигнала, зависящее от мгновенной частоты сигнала и непосредственно оцениваемое по АЧХ i -го компонента (для цифровых компонентов этот коэффициент считается тождественно равным 1); t_n - номинальный момент выполнения измерений; t_{ip} - реальный момент выполнения измерений i -ым компонентом; $\Delta_6(.)$ - составляющая полной погрешности, причиной которой служит взаимное влияние измеряемых каналов, которая условно считается приведенной к моменту завершения измерений. Погрешности отдельных компонентов в модели (1) сами суть комбинации различных составляющих:

$$\Delta_i(X(t), Z_i(t)) = \Delta_{io}(X(t)) + \Delta_{id}(Z_i(t)), \quad (2)$$

где $\Delta_{io}(.)$ - основная составляющая инструментальной погрешности i -го компонента измерительного канала; $\Delta_{id}(.)$ - дополнительная составляющая инструментальной погрешности компонента измерительного канала; остальные обозначения аналогичны принятым в (1). Наконец, полная погрешность результата прямых измерений в измерительном канале есть

$$\Delta(t) = \tilde{X}(t) - X(t), \quad (3)$$

а полная погрешность результата косвенных измерений, выполняемых по результатам прямых измерений в группе измерительных каналов -

$$\Delta(t) = g(\tilde{X}(t)) - g(\bar{X}(t)), \quad (4)$$

где $g(.)$ - некоторая зависимость между результатами прямых измерений и значением измеряемой величины; $\bar{X}(t)$ и $\tilde{X}(t)$ - вектора истинных значений физических величин и результатов их прямых измерений.

Использование метрологической модели, заданной соотношениями (1), (2), (3) и (4), в составе системы имитационного моделирования, целесообразно производить с учетом следующих принципов.

1. Измерительный канал описывается в виде измерительно-вычислительной цепи, т.е. в виде совокупности аппаратных и программных компонентов, последовательно передающих друг другу преобразуемый сигнал измерительной информации.

2. Моделью, описывающей топологию передачи преобразуемого сигнала измерительной информации в многоканальной системе, является лес корневых деревьев (см. рис. 1).

3. Моделью, описывающей топологию передачи управляющих воздействий между компонентами и отражающей дискретно-событийное представление функционирования измерительной системы, является ориентированный циклический граф вида “гамильтонов контур” (см. Рис. 2), дуги которого маркированы значениями длительностей временных интервалов.

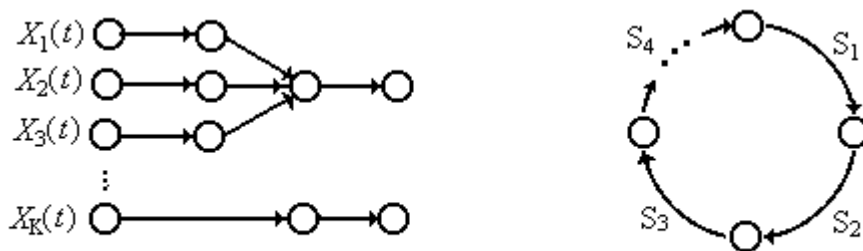


Рис. 1. Граф передачи информации Рис. 2. Граф передачи управления

4. Моделями измеряемой и влияющей физических величин являются случайные функции времени (а также детерминированные функции, как частный случай).

5. Моделью, описывающей последовательность значений реальных моментов измерений, является случайный поток событий.

6. Моделью основной составляющей инструментальной погрешности аппаратных компонентов является случайная функция измеряемой величины (а также случайная величина, как частный случай).

7. Моделью дополнительной составляющей инструментальной погрешности аппаратных компонентов является случайная функция влияющей физической величины (а также детерминированная функция и случайная величина, как частные случаи).

8. Моделью номинальной статической функции преобразования (градуировочной характеристики) компонента является функция входного аргумента.

9. Моделью динамической характеристики преобразования (АЧХ) аналогового компонента является функция частоты изменения входного аргумента.

10. Моделью отклонения динамической характеристики преобразования аналогового компонента от ее номинального значения является случайная величина.

11. Моделью погрешности взаимопроникновения измерительных каналов является случайная величина.

Пункты 4-11 соответствуют требованиям /2/, что позволяет использовать в качестве параметров конкретной имитационной модели метрологические характеристики компонентов, почерпнутые непосредственно из их сопроводительной документации.

Часть приведенных выше принципов была использована при разработке и реализации объектно-ориентированной системы ООС ПСИ, представлявшей собой своего рода программный “конструктор” и позволявшей генерировать из типовых “деталей” имитационные модели многоканальных подсистем измерений и исследовать в ходе статистического эксперимента их метрологические характеристики /4,5/. ООС ПСИ характеризовалась следующими особенностями /4/: 1) была реализована в виде комплекса программ операционной системы Ms-Dos; 2) обеспечивала моделирование узкого класса подсистем измерений с типовыми структурами измерительных каналов; 3) требовала предварительного описания топологии моделируемой системы и перечня оцениваемых характеристик в текстовом виде средствами специализированного дескриптивного языка ЯОЗИ. Практическое применение ООС ПСИ в реальных задачах проектирования подсистем измерений АСУ ТП Жигулевской ГЭС подтвердило адекватность получаемых при помощи ООС ПСИ результатов и целесообразность ее использования /5/. В настоящий момент в лаборатории АСНИ Самарского государственного аэрокосмического университета разрабатывается система имитационного моделирования БВП ПСИ, реализующая полный набор принципов 1-11.

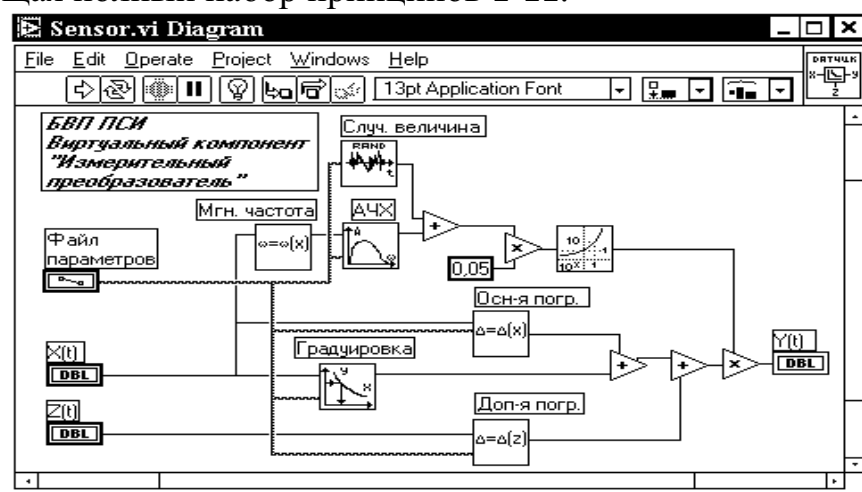


Рис. 3. Модель измерительного преобразователя

БВП ПСИ представляет собой библиотеку виртуальных приборов LabVIEW /6/ и систему правил построения из них имитационных моделей измерительных систем. В составе библиотеки:

- генераторы случайных процессов и случайных величин с разными законами распределения;
- виртуальные приборы, реализующие разнообразные функциональные зависимости;
- виртуальные приборы, моделирующие работу различных аппаратных компонентов (датчиков - см. рис. 3, усилителей, АЦП, мультиплексоров и т.п.) и программных компонентов (процедур тарировки, сжатия и восстановления данных и т.п.) измерительных каналов;
- виртуальный прибор, реализующий случайный поток событий в модельном времени и управляющий ходом имитационного эксперимента;
- виртуальные приборы, осуществляющие сбор данных о протекании имитационного эксперимента;
- виртуальные приборы, позволяющие оценивать по данным, полученным в ходе имитационного эксперимента, необходимые метрологические характеристики.

Методика применения систем типа ООС ПСИ или БВП ПСИ для оценивания метрологических характеристик измерительных систем заключается в следующем.

1. Производится построение концептуальной модели системы, включающей:

- перечень программных и аппаратных компонентов;
- метрологические характеристики аппаратных компонентов (берутся из сопроводительной документации или оцениваются экспериментально);
- времена выполнения программных компонентов и временные задержки, характеризующих работу аппаратных компонентов (берутся из сопроводительной документации или оцениваются экспериментально);
- описание графа передачи информации между компонентами;
- описание алгоритмов управления процессом сбора и обработки измерительной информации в виде графа передачи управления;
- априорную информацию об измеряемых величинах, внешних условиях работы системы и т.п.

2. Концептуальная модель описывается встроенными средствами моделирующей среды (для БВП ПСИ моделирующей средой является LabVIEW, а в качестве этих средств описания используется язык графического программирования G).

3. Выполняется необходимое количество прогонов статистического эксперимента.

4. По полученным в результате экспериментов данным производится оценивание необходимых метрологических характеристик.

Этапы 2-4 выполняются средствами БВП ПСИ в автоматизированном режиме. На последнем этапе также возможно использование внешних по отношению к моделирующей системе программных средств, таких как MS Excel, MathCad, StaDia и т.п.

Типовыми задачами, возникающими на этапе проектирования измерительных систем, которые целесообразно решать при помощи средств имитационного моделирования типа ООС ПСИ или БВП ПСИ, являются:

- оценивание числовых и качественных характеристик полной погрешности результата измерений в измерительных каналах;
- исследование влияния различных компонентов и групп компонентов измерительных каналов на полную погрешность результата измерений;
- исследование влияния алгоритмов работы моделируемой системы (например, порядка опроса измерительных каналов) на полную погрешность результата измерений;
- исследование влияния алгоритмов работы моделируемой системы на вид и характеристики выходного потока измерительной информации (т.е. класс задач, рассматриваемых, например, в [7]);
- выбор оптимальной структуры измерительной системы и ее фрагментов по критериям точности, быстродействия и пр.

Список использованных источников

1. МИ 222-80. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов измерительных систем по метрологическим характеристикам компонентов. - М.: Госстандарт, 1980. - 38 с.
2. ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - 38 с.
3. Цветков Э.И. Процессорные измерительные средства. - Л.: Энергоатомиздат, 1989. - 221 с.
4. Объектно-ориентированные средства для исследования подсистем измерения АСНИ / Орищенко В.И., Прудников И.В., Пшеничников В.В. - Самара: САИ, 1991. - 91 с.
5. Климентьев К.Е. Автоматизированная система для оценивания точностных и динамических характеристик программно-управляемых подсистем измерений: Автореф. дисс. канд. техн. наук. - Самара, 2000. - 16 с.
6. Климентьев К.Е. Основы графического программирования в среде LabVIEW / Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2003. - 79 с.
7. Ефимов А.Н., Рубанов В.Г. Оптимизация процессов первичной обработки информации в АСУ. - Киев: Техника, 1976. - 143 с.