

УЧЕТ ВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ПРИНЦИПОВ ИНТЕРНЕТ-МЕТРОЛОГИИ

Вступление

Использование компьютерных и сетевых технологий в измерительной технике в последнее время позволяет реализовать удаленные поверку, калибровку либо контроль метрологических отказов с использованием возможностей сети Интернет.

Удаленность процедуры подразумевает доступ метрологической службы к подконтрольному (учетному) оборудованию, которое может находиться на большом от нее расстоянии. При этом возможность прямого доступа службы к данному оборудованию (либо его транспортировка) может отсутствовать либо сопровождаться значительными временными и экономическими затратами.

Таким образом, ввод в эксплуатацию технологий, реализующих удаленные метрологические процедуры с использованием Интернета, являются экономически эффективными и полезными для технического прогресса [1, 2].

В Интернет-метрологии при отладке механизмов удаленного метрологического контроля важна программная либо аппаратная симуляция работы средств измерительной техники (СИТ), которая позволяет:

- обеспечить настройку и тестирование программного обеспечения удаленной поверки и калибровки;
- обеспечить обучение и тренинг персонала, участвующего в удаленных метрологических процедурах.

В частности, важно исследование составляющих погрешности поверяемого информационного параметра приборов, подлежащих удаленному метрологическому контролю.

Постановка задачи

Для отладки механизмов Интернет-поверки либо калибровки, прогнозирования величины межповерочного интервала (а также тестирования и метрологической аттестации соответствующих программных средств) необходимо создание средств программной либо аппаратной симуляции работы СИТ.

Кроме того, моделирование работы СИТ при использовании в сфере Интернет-метрологии сопутствует эффективному обучению удаленным метрологическим процедурам персонала предприятий без непосредственного участия специалистов метрологического центра.

Цель статьи – рассмотреть аспекты моделирования, которые необходимо учитывать при разработке виртуальных тренажеров для Интернет-метрологии; сформировать систему статистических характеристик для наиболее полного описания поведения во времени измерительных сигналов СИТ.

Необходимо определить требования к характеристикам средств симуляции, которые должны соответствовать реальному поведению СИТ в процессе эксплуатации. В статье необходимо определить минимальный набор характеристик для наиболее полного описания поведения во времени измерительных сигналов СИТ.

Важность дрейфовой составляющей погрешности для моделирования

При виртуальном моделировании работы СИТ, в частности, их точностных характеристик, необходимо использовать соответствующие математические либо вероятностные модели. В подавляющем большинстве случаев учитывают свойство аддитивности составляющих погрешностей, вследствие чего производят расчет и моделирование нескольких составляющих суммарной погрешности прибора с последующим их суммированием.

Погрешности информативных параметров любых СИТ условно подразделяют на систематические и случайные.

Однако при увеличении времени исследования (и времени работы прибора) до значений, превышающих длительность процесса измерения и сеанса работы с реальным СИТ, целесообразно выделять третью категорию погрешности прибора – дрейфовую (или прогрессирующую). Дрейф обусловлен, как правило, процессами старения различных деталей и компонентов аппаратуры. Следует отметить, что данное выделение прогрессирующей погрешности в отдельный тип условно, поскольку дрейф обладает схожими со случайной погрешностью стохастическими свойствами. Главное отличие состоит в низкой скорости их проявления. Таким образом, спектры случайной и дрейфовой погрешностей разнесены и не перекрываются. Особенностью дрейфовой погрешности является сложность ее длительной компенсации, в отличие, от случайной и систематических составляющих.

Также следует отметить, что в настоящее время в виртуальных моделях СИТ (учебных тренажерах и др.) учет дрейфовых составляющих погрешности распространен мало.

Учет временного изменения дрейфовой погрешности в виртуальных моделях

В работе [3] выделяют несколько подходов к математическому представлению динамики изменения погрешности. В частности, в [1] описаны 4 типа модели для представления динамики погрешности во времени:

1) линейная модель динамики, основанная на предположении о постоянстве скорости изменения дрейфовой погрешности (однако опытные данные свидетельствуют о том, что данную модель динамики погрешности следует применять лишь для грубой аппроксимации реальных физических процессов);

2) экспоненциальная модель динамики основана на предположении об экспоненциальном характере дрейфа информативного параметра средства измерения (данная модель характеризуется достаточно высокой адекватностью для определенных временных участков):

3) логистическая модель динамики основана на объединении двух экспоненциальных моделей (при этом до некоторого момента времени дрейф экспоненциально возрастает, после чего экспоненциально уменьшается);

4) спектральное описание динамики дрейфовой погрешности, основанное на представлении времени использования СИТ в логарифмическом масштабе. При этом временные координаты отсчета для формирования кривой дрейфовой погрешности располагаются на оси времени равномерно. Таким образом, в начале эксплуатации СИТ данные для представления дрейфа представлены с увеличенной частотой.

Спектральное описание динамики дрейфа является наиболее точным для СИТ. Для точного определения динамики погрешности на начальном временном отрезке работы СИТ необходимо производить учащенные поверки. Экспериментальные данные подтвердили, что при стандартном межповерочном интервале в 1 год для многих СИТ можно идентифицировать лишь замедление процесса старения, тогда как предшествующее ускорение (начальное возрастание дрейфа) может быть незамеченным. Кроме того, численное описание динамики погрешности конкретного СИТ спектральным методом более громоздко по сравнению с предыдущими моделями и составляет массив чисел, описывающих логарифмический спектр амплитуд погрешности.

Зависимость дрейфовой погрешности от декларируемого значения информативного параметра

Следует учитывать, что в большинстве случаев данные о приведенной погрешности дрейфа характеризуют ее динамику для

прибора в целом, то есть без указания номинальных значений информативного параметра, на которых были рассчитаны погрешности. Кроме того, модели динамики погрешностей, рассмотренные в [3], разрабатывались для уточнения частоты метрологических отказов, без рассмотрения особенностей динамики при изменении собственно информативного параметра (смене точки входного либо выходного диапазонов), если данное изменение возможно.

Поэтому для полноценного моделирования работы многократных мер и СИТ с достаточно широким диапазоном входных значений необходим переход от одной кривой описания динамики дрейфа к семейству кривых (что схематически представлено на рисунке 1).

При моделировании необходимо учитывать параметры n кривых дрейфа (то есть иметь 3-5 численных параметров для задания каждой кривой) для каждого из поддиапазонов измерения либо генерации сигнала. Точки поддиапозона, для которых необходимо задание кривых, проще всего выбирать из условия равномерного их расположения в пределах поддиапозона. Кроме того, следует устанавливать допуски от концов поддиапозона для крайних исследуемых точек для избежания работы устройств в режиме перегрузки. Аналогичным образом, согласно [4, 5] и другим аналогичным нормативным документам, выбираются точки для поверки СИТ при отсутствии данной информации в технических условиях на изделия конкретных типов.

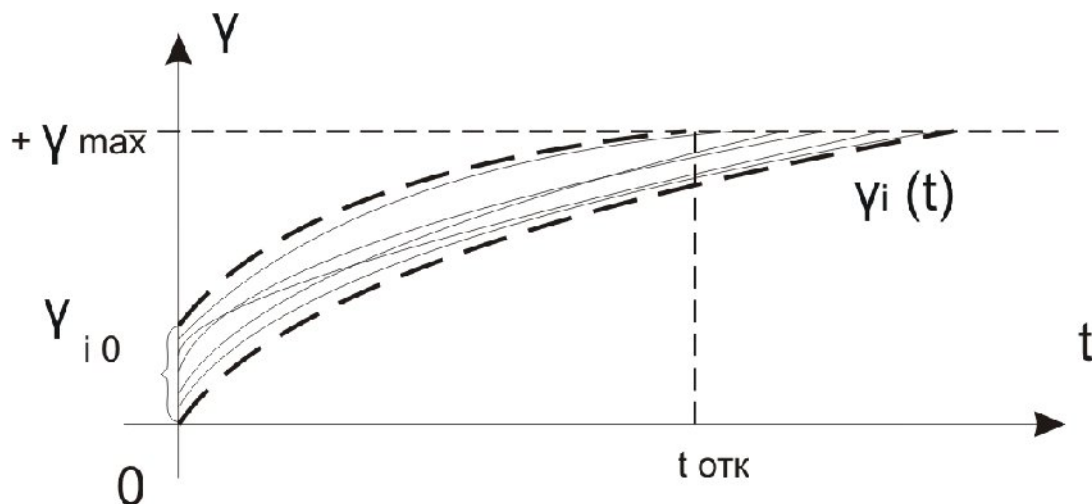


Рис. 1. Семейство кривых $\gamma_i(t)$ дрейфовой погрешности для различных уровней информативного параметра прибора (γ_{i0} – неустранимые при последнем ремонте либо калибровке приведенные погрешности)

Характер изменения распределения случайных погрешностей во времени

В соответствии с центральной предельной теоремой, случайной составляющей погрешности информативных параметров СИТ зачастую приписывают нормальное распределение, что частично подтверждается многочисленными экспериментальными данными.

Однако на практике распределение погрешности в конкретный момент времени (в частности сразу после калибровки либо метрологического ремонта) не является точным подобием гауссианы, а характеризуется некоторой степенью приближения к ней. Может быть неодинаковой крутизна боковых спадов распределения, а для экспериментальных оценок в различные моменты времени острота центра распределения также может отличаться.

При этом разность моментов времени, в которых выполняется экспериментальный расчет функции распределения случайной погрешности, обычно довольно велика (порядка месяцев и более). Исходя из данной тенденции, а также из того, что разность крутизны боковых спадов и острота вершины функции распределения постоянны в течение сеанса работы с СИ, можно констатировать, что случайная составляющая погрешности обладает рядом свойств, характерных для прогрессирующих погрешностей, в частности, низкоскоростным их проявлением. Кроме того, данные свойства проявляются также в случае, если случайной погрешности приписывается закон распределения, отличный от нормального.

В [6] отмечено, что для описания изменения случайной составляющей погрешности в течение длительного времени целесообразно использовать зависимость от времени коэффициентов асимметрии $A(t)$, эксцесса $E(t)$ и значения среднего квадратического отклонения (СКО) $\sigma(t)$. Отметим, что использование данных коэффициентов корректно и при других приписываемых законах распределения, наряду с нормальным. На рис. 2 схематически представлен характер временного изменения эксцесса и асимметрии сигнала на выходе кварцевого генератора (по данным [6]). Очевидно, что для описания изменения случайных погрешностей целесообразно применять аналогичные описанию динамики дрейфа методы. Из рис. 2 очевидна адекватность неравномерного расположения отсчетов кривой эксцесса по оси времени.

Зависимость параметров распределения случайной составляющей погрешности от декларируемого значения информативного параметра

В [4] и других информационных источниках приводятся инструкции по выполнению поверки СИТ. В частности, при определении случайной составляющей погрешности предписано вычисление СКО в каждой поверяемой точке рабочих диапазона или поддиапазона. После чего в

качестве характеристики случайной составляющей погрешности выбирают наибольшее из полученных значений СКО.

Очевидно, что при разработке виртуальных моделей СИТ в большинстве случаев используют паспортные данные приборов либо результаты периодических поверок. В этом случае в виртуальной модели можно корректно отобразить лишь максимальную на диапазон (поддиапазон) случайную погрешность, но не характер ее изменения в зависимости от значения информативного параметра в пределах диапазона.

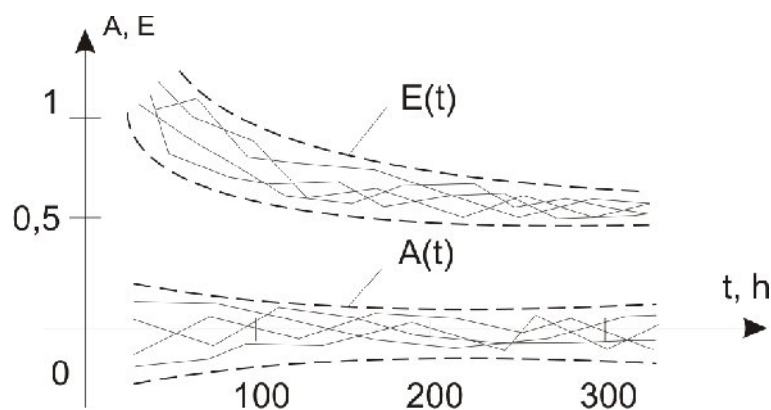


Рис. 2. Изменение во времени эксцесса $E(t)$ и асимметрии $A(t)$ кварцевого генератора (по данным [6], два семейства кривых после оценки характеристик партии СИТ)

Формирование перечня метрологических параметров для разработки модели функционирования СИТ

Адекватность виртуальной модели-тренажера можно значительно увеличить путем учета данных об асимметрии, эксцессе и СКО в нескольких контрольных точках диапазона. Таки образом для разработки соответствующих виртуальных тренажеров необходимо учитывать временные и внутридиапазонные изменения коэффициентов асимметрии, эксцесса, значений СКО и временного дрейфа. Для удобства представления данной информации возможно использовать специальную матрицу $M1$ с соответствующими данными, представленную на рис. 3.

Для матрицы $M1$ приняты следующие обозначения:

$X_0, \dots, X_i, \dots, X_n$ – декларируемые значения информативного параметра прибора;

X_n – номинальное значение (конечное значение рабочего диапазона либо поддиапазона);

t_0, \dots, t_j, \dots – ряд значений времени, для которых моделируются параметры работы прибора (как показано в [1], отсчеты временной сетки

должны быть распределены в логарифмическом масштабе относительно времени изготовления прибора);

$\{A_{i,j}; E_{i,j}; \sigma_{i,j}; \gamma_{i,j}\}$ – кортеж метрологических параметров (коэффициентов эксцесса, асимметрии, СКО и приведенное значение дрейфа) для точки рабочего диапазона X_i во время t_j .

	X_0	...	X_i	...	X_n	Максимумы параметров
t_0	$\{A_{0,0}; E_{0,0}; \sigma_{0,0}; \gamma_{0,0}\}$	...	$\{A_{i,0}; E_{i,0}; \sigma_{i,0}; \gamma_{i,0}\}$	...	$\{A_{n,0}; E_{n,0}; \sigma_{n,0}; \gamma_{n,0}\}$	$\{\max|A_{i,0}|; \min(E_{i,0}); \max(\sigma_{i,0}); \max(\gamma_{i,0})\}$
....
t_j	$\{A_{0,j}; E_{0,j}; \sigma_{0,j}; \gamma_{0,j}\}$	...	$\{A_{i,j}; E_{i,j}; \sigma_{i,j}; \gamma_{i,j}\}$	...	$\{A_{n,j}; E_{n,j}; \sigma_{n,j}; \gamma_{n,j}\}$	$\{\max|A_{i,j}|; \min(E_{i,j}); \max(\sigma_{i,j}); \max(\gamma_{i,j})\}$
...

Рис. 3. Матрица M1 изменения параметров измерительного сигнала в зависимости от общего времени службы прибора и точки диапазона

Также следует учитывать изменение параметров измерительного сигнала с момента перевода прибора в рабочий режим (в течение сеанса работы с ним). Данные явления связаны с прогревом элементов аппаратуры, изменением их температуры и прочими факторами. Перечень необходимых для такого учета данных представлен в соответствующей матрице коэффициентов M2, представленной на рис. 4. Для представления данных в M2 приняты следующие обозначения:

t_k – прошедшее от момента включения прибора время (характер размещения на оси времени также логарифмический);

$k_{A_{i,j}}$ и $k_{E_{i,j}}$ – коэффициенты изменения коэффициентов асимметрии и эксцесса в зависимости от времени нахождения прибора в рабочем режиме;

$$A(X_i, t_{i+k}) = A_{i,j+k} = k_{A_{i,k}} \cdot A_{i,j};$$

$$E(X_i, t_{i+k}) = E_{i,j+k} = k_{E_{i,k}} \cdot E_{i,j};$$

$k_{\sigma ij}$ и $k_{\gamma ij}$ – коэффициенты изменения СКО и дрейфовой составляющей погрешности в зависимости от времени нахождения прибора в рабочем режиме:

$$\sigma(X_i, t_{i+k}) = \sigma_{i,j+k} = k_{\sigma i,k} \cdot \sigma_{i,j};$$

$$\gamma(X_i, t_{i+k}) = \gamma_{i,j+k} = k_{\gamma i,k} \cdot \gamma_{i,j};$$

где $N(X_i, t_{i+k}) = N_{i,j+k}$ – величина параметра N для сигнала в точке измерительного диапазона X_i прибора, запущенного в i -й момент времени от начала эксплуатации и проработавшего время t_k .

	X_0	...	X_i	...	X_H
t_0	$\{k_{A 0,0};$ $k_{E 0,0};$ $k_{\sigma 0,0};$ $k_{\gamma 0,0}\}$	...	$\{k_{A i,0};$ $k_{E i,0};$ $k_{\sigma i,0};$ $k_{\gamma i,0}\}$	...	$\{k_{A H,0};$ $k_{E H,0};$ $k_{\sigma H,0};$ $k_{\gamma H,0}\}$
....
t_k	$\{k_{A 0,k};$ $k_{E 0,k};$ $k_{\sigma 0,k};$ $k_{\gamma 0,k}\}$	...	$\{k_{A i,k};$ $k_{E i,k};$ $k_{\sigma i,k};$ $k_{\gamma i,k}\}$	...	$\{k_{A H,k};$ $k_{E H,k};$ $k_{\sigma H,k};$ $k_{\gamma H,k}\}$
...

Рис. 4. Матрица M2 коэффициентов изменения параметров в зависимости от времени в рабочем режиме и точки диапазона

Следует отметить, что матрица коэффициентов M2 актуальна лишь для начала рабочего времени прибора (обычно порядка получаса), после чего данная матрица вырождается в единичную матрицу с информацией в ячейках $\{k_{A i,k}; k_{E i,k}; k_{\sigma i,k}; k_{\gamma i,k}\} = \{1; 1; 1; 1\}$, а параметры измерительного сигнала подчиняются описанию с помощью общей матрицы M1. Таким образом, вертикальный размер матрицы M2 является ограниченным.

Выводы

В статье были рассмотрены особенности программного моделирования поведения измерительных сигналов и погрешностей СИТ во времени. Было установлено, что при построении виртуальных тренажеров, симулирующих поведение СИТ в процессе эксплуатации,

необходимо учитывать изменение во времени действительных значений информативного параметра (измерительного сигнала в нескольких точках рабочего диапазона либо поддиапазонов).

Для полноты описания соответствующих процессов с использованием минимального набора характеристик целесообразно объединение четырех статистических характеристик сигнала (коэффициентов эксцесса, асимметрии, СКО, дрейфовой составляющей) в матрицы зависимостей от времени и точки рабочего диапазона. Впоследствии с использованием данных матриц удобно выполнять моделирование измерительного сигнала реальных СИТ с постоянной и псевдослучайной составляющими, подчиняющимися определенным закономерностям.

Выбранный перечень статистических характеристик позволяет при минимальном занимаемом объеме информации наиболее полно описать поведение во времени измерительных сигналов СИТ.

Список использованной литературы

1. <http://www.internetcalibrations.com/%5BDudley%5D%20Internet%20Calibration.pdf> – R.A. Dudley: Internet Calibration, Handbook of Measuring System Design, 2005.
2. <http://www.internetcalibrations.com/%5BTC4%202008%5D%20On%20the%20Remote%20Calibration%20of%20Electrical%20Energy%20Meters.pdf> – D. Amicone, A. Bernieri, G. Betta, L. Ferrigno, M. Laracca: On the Remote Calibration of Electrical Energy Meters.
3. *Новицкий П. В., Зограф И. А., Лабунец В. С.* Динамика погрешностей средств измерений – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990 – 192 с.
4. ДСТУ 7227:2011 «Метрологія. Частотоміри. Методика повірки (калібрування)».
5. ДСТУ 7231:2011 «Метрологія. Перетворювачі та компаратори термоелектричні еталонні. Методика повірки (калібрування)».
6. *Недоступ Л. А., Удовиченко Е. Т., Шевцов Г. А.* Технологические методы управления качеством радиоэлектронных измерительных устройств – М. : Издательство стандартов, 1976. – 124 с.