



И.А. САХНЮК

УДК 389.14:621

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Ключевые слова: метрологическая надежность, метрологический отказ, показатель метрологической надежности, параметр функции преобразования.

ВВЕДЕНИЕ

Оценивание метрологической надежности средств измерений актуально на всех этапах их жизненного цикла, так как в настоящее время устанавливаются все более жесткие требования к продолжительности безотказной работы средств измерений. Более половины отказов средств измерений обусловлено постепенными изменениями метрологических характеристик во времени [1]. Изменения такого типа связаны с деградацией комплектующих элементов и сопровождаются скрытыми отказами, называемыми метрологическими. Зафиксировать моменты времени наступления таких отказов в процессе эксплуатации, в отличие от явных внезапных отказов, практически невозможно. Поэтому установление пригодности средств измерений к применению осуществляется только при проведении метрологической аттестации или поверки данного средства измерений. При этом надежность средств измерений в части сохранения его метрологической исправности называют метрологической надежностью [2].

Постановка проблемы метрологической надежности средств измерений заключается в выборе критерия по определению оптимальных характеристик средств измерений в качестве показателей метрологической надежности. Предметом исследования является изменение параметров функции преобразования (ФП) измерительного канала в результате физико-химических процессов деградации комплектующих элементов средства избыточных измерений (ИИ).

Цель данной работы — установить критерий метрологической надежности средств ИИ на основе методов ИИ путем определения уравнений величин, описывающих параметры измерительного канала при линейной и нелинейной ФП с использованием рядов корректирующих физических величин (КрФВ) однородных с контролируемой физической величиной (КнФВ).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ

В приборостроении, как правило, в качестве показателей метрологической надежности средств измерений выбирают показатели безотказности на основе нормирования вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа, а также показатели долговечности, такие как средний срок службы и средний ресурс. Значения нормируемых показателей надежности учитываются при назначении цены средств измерений, гарантийного срока эксплуатации и т.п.

По мнению многих авторов [3–6] критерии метрологической надежности средств измерений определяются оцениванием надежности средств измерений по известным

характеристикам надежности комплектующих элементов с учетом дрейфа их параметров. В свою очередь, авторы рассматривали методы повышения метрологической надежности средств измерений, состоящие в коррекции начального запаса основной погрешности проектируемого средства измерений. Интенсивность дрейфа и метрологический ресурс, по их мнению, — основные расчетные характеристики метрологической надежности.

В настоящее время активно развивается теория избыточных измерений, позволяющая подойти к рассмотрению вопроса о выборе критерия метрологической надежности средств ИИ с иной точки зрения [7–9]. В качестве оцениваемых метрологических характеристик средств ИИ выбираются параметры ФП и определяется характер их изменения под воздействием дестабилизирующих факторов. Изменения параметров ФП рассматриваются как совокупный результат физико-химических процессов старения комплектующих элементов.

При прямом методе измерения КнФВ независимо от вида ФП измерительного канала, в отличие от методов ИИ, описать параметры ФП уравнениями величин практически невозможно.

В настоящей работе на основе методов ИИ по результатам промежуточных измерений КрФВ получены уравнения величин, описывающие параметры сенсора и/или измерительного канала средства ИИ при линейной и нелинейной ФП, которые приведены в таблице.

Чувствительными элементами сенсоров являются вещества и материалы с определенными свойствами. Они подвергаются внешним воздействиям окружающей среды, которые приводят к изменениям свойств чувствительного элемента во времени и, как следствие, к изменениям параметров ФП измерительного канала. Запишем уравнение величин, описывающее параметры ФП измерительного канала, в общем виде: $S'_{л} = ({}^1S_{л}) + \Delta S_{л}(t)$, где $S'_{л}$ — параметр ФП, характеризующий чувствительность средства ИИ на момент изготовления; ${}^1S_{л}$ — номинальный параметр ФП измерительного канала, $\{{}^1S_{л}\} = 1$; k_1 — коэффициент, $k_1 = 1$; $\Delta S_{л}(t)$ — параметр ФП, характеризующий изменение крутизны преобразования (наклон), $\Delta S_{л}(t) = \Delta S_{л1}$. Приращения $\Delta S_{л}$ и/или $\Delta S_{н}$, обусловленные физико-химическими процессам старения, за время измерения $t_{и}$ КнФВ существенно не изменяются ($\Delta S_{л} = \Delta S_{л}(t_{и}) = \text{const}$ и/или $\Delta S_{н} = \Delta S_{н}(t_{и}) = \text{const}$).

В свою очередь, за интервалы времени, равные, например, межповерочному интервалу или среднему сроку службы, вследствие деградации комплектующих элементов измерительного канала во время эксплуатации (хранения) возникает прогрессирующая погрешность, которая характеризуется приращениями $\Delta S_{л\eta}(t)$ и/или $\Delta S_{н\eta}(t)$. Тогда параметры ФП примут вид $S'_{л\eta}(t) = ({}^1S_{л}) + \Delta S_{л\eta}(t)$ и/или $S'_{н\eta}(t) = ({}^1S_{н}) + \Delta S_{н\eta}(t)$. Индекс η показывает, что параметры ФП изменяются за время эксплуатации (хранения) в результате деградации комплектующих элементов.

Смещение нуля $\Delta u'_{л}$ или $\Delta u'_{н}$ ФП представляет собой аддитивную составляющую погрешности, которая при методе прямых измерений корректируется только при включении средства измерений. Методы ИИ позволяют контролировать данные параметры во время эксплуатации средств измерений по результатам промежуточных измерений КрФВ и описать уравнениями величинами, приведенными в таблице.

Один из методов прогнозирования метрологической надежности средств измерений основывается на скорости изменения параметров ФП за определенный интервал времени. В качестве прогностической модели наступления метрологического отказа используется, например, экспоненциальная модель вида $S'_{л\eta}(t) = S'_{л} \cdot \exp(a \cdot t \cdot \exp(-b/T))$ [1]. Прогнозируемые значения параметров $S'_{л\eta}(t)$ и/или $S'_{н\eta}(t)$ определяются в произвольный момент времени t , когда постоянные a, b зависят от свойств материалов, технологии изготовления и температуры T окружающей среды. Действительные (текущие) значения параметров $S'_{л\eta}$ и/или $S'_{н\eta}$ определяются на основе методов ИИ по результатам промежуточных измерений КрФВ.

Таблица. Математические модели методов ИИ и уравнения величин, описывающие параметры ФП измерительного канала средств ИИ

Функция преобразования	Математические модели	Уравнения величин, описывающие параметры ФП
Линейная	$\left. \begin{aligned} y_{n1} &= S'_n (x_0 - \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n2} &= S'_n (x_0 + \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n3} &= S'_n (x_i + x_0 - \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n4} &= S'_n (x_i + x_0 + \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n5} &= S'_n (0x_i) + \Delta y'_n \end{aligned} \right\}$	$S'_n = \frac{y_{n2} - y_{n1}}{k_2 \Delta x_0}$ $\Delta y'_n = y_{n5}$
Квадратичная	$\left. \begin{aligned} y_{n1} &= S'_{n1} x_0^2 + S'_{n2} x_0 + \Delta y'_n \\ y_{n2} &= S'_{n1} (x_0 - \Delta x_0)^2 + S'_{n2} (x_0 - \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n3} &= S'_{n1} (x_0 + \Delta x_0)^2 + S'_{n2} (x_0 + \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n4} &= S'_{n1} (x_i - \Delta x_0)^2 + S'_{n2} (x_i - \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n5} &= S'_{n1} (x_i + \Delta x_0)^2 + S'_{n2} (x_i + \Delta x_0) + \Delta y'_n \end{aligned} \right\}$	$S'_{n1} = \frac{k_1}{k_2 \Delta x_0^2} (y_{n3} + y_{n2} - k_2 y_{n1})$ $S'_{n2} = \frac{k_1}{k_2 \Delta x_0^2} (y_{n3} - y_{n2}) - \frac{x_0}{\Delta x_0} (y_{n3} + y_{n2} - k_2 y_{n1})$ $\Delta y'_n = \frac{x_0^2}{k_2 \Delta x_0^2} (y_{n3} + y_{n2} - k_2 y_{n1}) - \frac{x_0}{k_2 \Delta x_0} (y_{n3} - y_{n2}) + y_{n1}$
Виды многочленов третьей степени	$\left. \begin{aligned} y_{n1} &= S'_{n1} (x_0 - \Delta x_0)^3 + S'_{n2} (x_0 - \Delta x_0)^2 + S'_{n3} (x_0 - \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n2} &= S'_{n1} (x_0 - k_2 \Delta x_0)^3 + S'_{n2} (x_0 - k_2 \Delta x_0)^2 + S'_{n3} (x_0 - k_2 \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n3} &= S'_{n1} (x_0 + \Delta x_0)^3 + S'_{n2} (x_0 + \Delta x_0)^2 + S'_{n3} (x_0 + \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n4} &= S'_{n1} (x_0 + k_2 \Delta x_0)^3 + S'_{n2} (x_0 + k_2 \Delta x_0)^2 + S'_{n3} (x_0 + k_2 \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n5} &= S'_{n1} (x_i + x_0 - \Delta x_0)^3 + S'_{n2} (x_i + x_0 - \Delta x_0)^2 + S'_{n3} (x_i + x_0 - \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n6} &= S'_{n1} (x_i + x_0 - k_2 \Delta x_0)^3 + S'_{n2} (x_i + x_0 - k_2 \Delta x_0)^2 + S'_{n3} (x_i + x_0 - k_2 \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n7} &= S'_{n1} (x_i + x_0 + \Delta x_0)^3 + S'_{n2} (x_i + x_0 + \Delta x_0)^2 + S'_{n3} (x_i + x_0 + \Delta x_0) + \Delta y'_n \\ y_{n8} &= S'_{n1} (x_i + x_0 + k_2 \Delta x_0)^3 + S'_{n2} (x_i + x_0 + k_2 \Delta x_0)^2 + S'_{n3} (x_i + x_0 + k_2 \Delta x_0) + \Delta y'_n \end{aligned} \right\}$	$S'_{n1} = \frac{(y_{n2} - y_{n3}) - (y_{n1} - y_{n4})}{k_2 \Delta x_0^3} - \frac{x_0 (k_2 (y_{n1} - y_{n3}) - (y_{n2} - y_{n4}))}{k_2 \Delta x_0^3}$ $S'_{n2} = \frac{(y_{n4} - y_{n2}) - k_2 (y_{n3} - y_{n1})}{k_3 k_2^2 \Delta x_0^3}$ $S'_{n3} = \frac{(y_{n2} - y_{n4}) - k_2^2 (y_{n1} - y_{n3})}{k_3 k_2^2 \Delta x_0} - \frac{x_0^2 ((y_{n2} - y_{n4}) - k_2 (y_{n1} - y_{n3}))}{k_3 k_2^2 \Delta x_0}$ $\Delta y'_n = \frac{k_2^2 (y_{n1} + y_{n3}) - (y_{n2} + y_{n4})}{k_3 k_2} - \frac{x_0^3 ((y_{n4} + y_{n2}) - k_2 (y_{n3} + y_{n1}))}{k_3 k_2 \Delta x_0^3} - \frac{x_0^2 (y_{n1} - y_{n4}) - (y_{n2} - y_{n3})}{k_3 k_2 \Delta x_0^2} - \frac{x_0 ((y_{n2} - y_{n4}) - k_2^2 (y_{n1} - y_{n3}))}{k_3 k_2^2 \Delta x_0}$

Примечание: $k_2 = 2$, $k_3 = 3$; x_0 — физическая величина заданного размера; x_i — измераемая КнФВ, $\{x_i\} = 0$; Δx_0 — физическая величина, нормированная по размеру КрФВ и однократно с КнФВ.

Сравнение результатов прогнозирования, полученных с использованием экспоненциальной модели изменения во времени параметров ФП, с текущими значениями параметров ФП, полученными по приведенным в таблице уравнениям величин, позволит исследовать метрологическую надежность средств ИИ на заключительных стадиях проектирования или в серийном производстве при испытаниях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве критерия метрологической надежности средств измерений выбран критерий по определению изменений во времени параметров ФП измерительного канала средств ИИ.

В отличие от прямого метода измерений и существующих подходов к оцениванию метрологической надежности средств измерений по известным характеристикам надежности комплектующих элементов с учетом дрейфа их параметров методы ИИ позволяют по результатам промежуточных измерений КрФВ определять действительные (текущие) значения параметров ФП на момент изготовления, а также в процессе эксплуатации (хранения) средства ИИ и независимо от момента времени проведения очередной поверки.

Анализ приведенных в таблице результатов исследований показал, что методы ИИ обеспечивают получение новых знаний о состоянии параметров ФП измерительного канала средств ИИ в течение всего срока их эксплуатации (хранения).

В дальнейшем оценивание метрологической надежности на основе предложенного критерия рекомендуется осуществлять как многоэтапный процесс, включающий следующие измерительные процедуры:

- нормирование параметров ФП измерительного канала при проведении метрологической аттестации или поверке средств ИИ;
- определение текущих значений параметров ФП по результатам промежуточных измерений КрФВ во время эксплуатации;
- корректирование систематической (прогрессирующей) составляющей погрешности результатов измерений.

Предлагаемый критерий метрологической надежности и последующее решение задачи оценивания метрологической надежности средств ИИ представляет научный и практический интерес для специалистов в области метрологической надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Екимов А.В., Ревяков М.И. Надежность средств измерительной техники. — Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1986. — 208 с.
2. РМГ 29–99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. — 44 с.
3. Фридман А.Э. Теория метрологической надежности средств измерений // Измерительная техника. — 1991. — № 11. — С. 3–10.
4. Фридман А.Э. Межповерочные интервалы и метрологическая надежность средств измерений // Приборы. — 2002. — № 6. — С. 56–63.
5. Чернышова Т.И. Метрологическая надежность средств неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, 2002. (Тамбов. гос. техн. ун-т).
6. Шиндяпин Д.А. Методы повышения метрологической надежности средств неразрушающего контроля теплопроводящих свойств материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук, 2002. (Тамбов. гос. техн. ун-т).
7. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2005. — № 1. — С. 7–24.
8. Кондратов В.Т., Сахнюк И.А. О метрологической надежности результатов избыточных измерений // Вісник Черкаськ. держ. техн. ун-ту. Спецвипуск. — 2007. — С. 114–116.
9. Кузнецов Н.Ю. Условия ограниченности относительной погрешности при ускоренном моделировании надежности немарковских систем // Кибернетика и системный анализ. — 2006. — № 4 — С. 63–80.

Поступила 26.05.2008