

Синтез интеллектуальных датчиков на основе введения минимальной структурной избыточности

Г. И. Козырев, А. В. Назаров, В. С. Солдатенко, В. Д. Усиков

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: gen-kozyrev@yandex.ru, naz-av@mail.ru, soldatenko_VS@mail.ru, usikov_1989@list.ru

Рассмотрены проблемы эксплуатации измерительных систем и изменения их параметров под действием различного рода дестабилизирующих факторов, в том числе времени, причём в наибольшей степени подобному влиянию подвержены первичные элементы измерительного тракта – датчики и преобразующая аппаратура. Отклонение значений параметров измерителей от номинальных значений приводит к существенным погрешностям при оценке неизвестного входного сигнала, что вызывает необходимость в текущей (в процессе эксплуатации) идентификации измерителя. Решена задача текущей идентификации параметров измерителя при неизвестных входных воздействиях. Процедура идентификации осуществляется введением дополнительного канала преобразования измеряемой величины в пространственной области. При этом преобразование измеряемой величины в дополнительном канале структурно-избыточного измерителя имеет вид предварительного функционального (нелинейного) преобразования m -й степени над входным сигналом. Решение задачи текущей идентификации рассмотрено для линейной статической характеристики основного канала измерительного преобразователя. Дополнительное уравнение при решении задачи текущей идентификации и проведении метрологического самоконтроля в интеллектуальном датчике представлено в виде регрессионной зависимости между выходными сигналами дополнительного и основного каналов структурно-избыточного измерителя. Неизвестные параметры регрессионного уравнения определены по результатам обработки временных отсчётов выходных сигналов дополнительного и основного каналов с помощью метода наименьших квадратов. Представлены зависимости среднеквадратической погрешности измерений входной величины от среднеквадратического значения шума измерений в выходных сигналах структурно-избыточного измерителя, динамики изменения входного сигнала и степени нелинейности m предварительного функционального преобразования в дополнительном измерительном канале. В ходе исследований выявлено, что форма и спектр входного сигнала на точность измерений влияют незначительно. Показано, что наибольшую точность измерений обеспечивает предварительное квадратичное ($m=2$) преобразование входного сигнала в дополнительном канале минимально-избыточного датчика. Результаты исследований можно использовать для метрологического самоконтроля в интеллектуальных датчиках или интеллектуальных измерительных системах.

Ключевые слова: дестабилизирующие факторы, текущая идентификация, предварительное функциональное преобразование, регрессия, метрологический самоконтроль.

Введение. Задача обеспечения высокого уровня метрологической надёжности проектируемых интеллектуальных измерительных систем составляет одну из важных задач практической метрологии. Основным показателем метрологической надёжности любой измерительной системы является метрологический ресурс, определяемый как интервал времени, в течение которого метрологическая характеристика измерительной системы будет находиться в пределах допустимых значений с заданной доверительной вероятностью [1, 2].

Элементная база измерительной системы имеет тенденцию к старению с течением времени, и, как результат,

значения параметров измерительной системы отклоняются от номинальных значений. Также на точность получаемых значений влияют внешние дестабилизирующие факторы окружающей среды, такие как температура, влажность, давление, радиоактивный фон и т. д. Все эти факторы приводят к увеличению погрешности измерений.

Один из подходов повышения метрологической надёжности измерительной системы – разработка интеллектуальных измерительных систем, в состав которых входят интеллектуальные датчики. Согласно ГОСТ Р 8.673-2009 «ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения»

под интеллектуальным датчиком понимается адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля, который должен содержать параметры и алгоритмы работы, способные изменяться в зависимости от внешних сигналов. Неотъемлемыми функциями интеллектуальных датчиков являются самообучение и самовосстановление при возникновении единичного сбоя.

В [3] приведена обобщённая структурная схема интеллектуального датчика, представляющая минимальный набор необходимых функциональных блоков любого интеллектуального датчика в соответствии ГОСТ Р 8.673-2009. Аналоговые сигналы, поступающие с первичных преобразователей, усиливаются и преобразуются в цифровую форму. На основании этих сигналов и сохранённых в постоянном запоминающем устройстве данных калибровки микроконтроллер корректирует полученные от первичного преобразователя значения измеряемой (или связанной с ней) величины и переводит их в требуемые единицы измерения. Таким образом компенсируется погрешность, вызванная влиянием температуры, дрейфом нуля и т. п. Кроме того, микроконтроллер контролирует состояние элементов первичного преобразователя и оценивает достоверность результата измерения. Обработанная цифровая информация передаётся посредством цифрового интерфейса и реализованных коммуникационных протоколов пользователю, который, в свою очередь, имеет возможность настраивать параметры датчика (пределы измерения и т. п.) и запрашивать дополнительную информацию о состоянии датчика и результатах измерений.

Широкое распространение получили так называемые «системы на кристалле», представляющие собой интегральную схему, содержащую помимо микроконтроллера встроенную память и множество периферийных устройств, среди которых могут быть прецизионные аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые преобразователи, таймеры, контроллеры последовательного порта, USB и Ethernet [4].

Метрологический самоконтроль является неотъемлемой функцией интеллектуальных датчиков и согласно ГОСТ Р 8.734-2011 «ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля» должен обеспечивать оценку метрологической исправности датчика с определением статуса результатов измерений.

В данной работе метрологический самоконтроль осуществляется в процессе текущей идентификации параметров датчика в результате введения в его структуру дополнительного канала с предварительным функциональным преобразованием измеряемой величины.

Синтез дополнительного канала. Отклонение параметров датчика от номинальных значений из-за воздействия различного рода дестабилизирующих факторов (ДФ), в том числе и времени, приводит к существенным погрешностям при оценке неизвестного входного сигнала. Зачастую перечень ДФ в процессе эксплуатации измерительных систем не всегда бывает известным. В этом случае возникает задача текущей (в процессе эксплуатации) идентификации

параметров датчика при неизвестной совокупности ДФ, включая и полезный входной сигнал, т. е. при неизвестных входных воздействиях.

Следует также отметить, что для большинства измерительных задач текущие параметры датчиков должны вычисляться без предположений о стационарности входного и выходного сигналов этих измерителей (как случайных процессов) и, следовательно, без предварительного оценивания корреляционных и взаимных корреляционных функций сигналов с целью последующего их использования в задачах идентификации. Подход, использующий такое оценивание, в процедурах текущей идентификации параметров датчиков невозможен даже формально из-за неизвестности входного сигнала $x(t)$.

Таким образом, задача текущей идентификации параметров датчика применительно к практике большинства измерительных задач должна формулироваться как задача оценивания оператора измерителя (его структуры и параметров) по результатам измерений только выходных сигналов датчика. Согласно принципу многоканальности Б. Н. Петрова [5] решение подобной задачи при воздействии на параметры датчика совокупности ДФ, спектр которых лежит в спектре полезного сигнала, невозможно без введения структурной избыточности во временной или пространственной области.

С практической точки зрения очень важным является исследование возможностей текущей идентификации датчика при неизвестных входных воздействиях в условиях минимальной избыточности, т. е. в условиях создания всего лишь одного дополнительного канала.

Как доказано в [6], необходимым и достаточным условием идентифицируемости параметров минимально-избыточного измерителя при неизвестных входных воздействиях является некоммутативность операторов основного F_1 и дополнительного F_2 измерительных каналов измерителя:

$$(F_1 F_2 - F_2 F_1)x(t) \neq 0. \quad (1)$$

Для идентификации параметров линейного стационарного измерительного канала F_1 структурно-избыточного датчика (СИД) в качестве дополнительного канала можно выбрать либо произвольную линейную нестационарную систему, либо произвольную нелинейную систему, поскольку их операторы не коммутируют с F_1 [7]. Из данного утверждения следует, что для успешного решения задачи идентификации степень нелинейности или закон изменения параметров нестационарного оператора должны быть заранее известны. Так как нестационарный измерительный канал с известным законом изменения его параметров во времени очень сложно реализовать на практике, то в дальнейшем речь пойдет о синтезе дополнительного канала СИД, оператор которого описывается с помощью нелинейной модели с сосредоточенными параметрами.

Пусть оператор F_1 принадлежит классу линейных и стационарных моделей. Тогда в качестве дополнительного канала СИД можно использовать нелинейную систему

с помощью введения в данный канал функционального преобразования L над входным сигналом вида

$$Lx(t) = [x(t)]^m, \quad (2)$$

где $m \geq 2$ – целое положительное число.

Допустим, что есть возможность осуществить преобразование (2) в начале измерительного тракта дополнительного канала СИД, а в дальнейшем использовать измерительный канал с характеристиками, идентичными основному каналу СИД. В этом случае общие выражения для описания минимально-избыточного СИД и условий идентифицируемости его параметров приобретают следующий вид:

$$y_1(t) = F_1 x(t); \quad (3)$$

$$y_2(t) = F_2 x(t) = F_1 L x(t); \quad (4)$$

$$(F_1 L - L F_1) x(t) \neq 0, \quad (5)$$

где L представляет собой нелинейное функциональное преобразование вида (2).

При выполнении условия (5) наблюдения за выходными сигналами $y_1(t)$, $y_2(t)$ СИД (см. (3), (4)) являются достаточными, чтобы исключить неизвестный входной сигнал $x(t)$ и получить следующее основное уравнение идентификации:

$$L F_1^{-1} y_1(t) = F_1^{-1} y_2(t). \quad (6)$$

Как следует из выражений (3)–(6), предварительное функциональное (нелинейное) преобразование (2) является частным случаем метода вспомогательных систем [6]. Однако учёт специфики выражения (2) существенно упрощает процедуру текущей идентификации неизвестных параметров основного канала СИД, а также позволяет избежать одного из существенных недостатков метода вспомогательных систем, связанного с определением основного оператора средства измерений с точностью до произвольной константы. Подобная неоднозначность объясняется тем, что скалярная система всегда коммутирует с параметрической [7]. Её можно устранить, если известен коэффициент усиления идентифицируемого измерителя.

Решение задачи текущей идентификации для линейной статической характеристики измерительного преобразователя. Пусть статическая характеристика основного канала СИД описывается с помощью линейного полиномиального выражения

$$y_1(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x(t), \quad (7)$$

где параметры $a_0(\xi)$, $a_1(\xi)$ являются нестабильными и зависят от влияния неизвестных ДФ $\xi(t)$.

При использовании коэффициентов номинальной статической характеристики датчика $a_{0н}$, $a_{1н}$ текущие параметры $a_0(\xi)$, $a_1(\xi)$ можно записать в виде

$$\begin{cases} a_0(\xi) = a_{0н} + \Delta a_0(\xi), \\ a_1(\xi) = a_{1н} + \Delta a_1(\xi), \end{cases} \quad (8)$$

где $\Delta a_0(\xi)$ – аддитивная погрешность (дрейф нуля), приведённая к выходу; $\Delta a_1(\xi)$ – мультипликативная погрешность датчика (дрейф коэффициента чувствительности).

При использовании в дополнительном канале предварительного преобразования степени m статическая характеристика данного канала будет выглядеть следующим образом:

$$y_2(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x^m(t). \quad (9)$$

Выражения (7), (9) при наблюдаемых выходных сигналах $y_1(t)$, $y_2(t)$ представляют собой систему из двух уравнений с тремя неизвестными $a_0(\xi)$, $a_1(\xi)$, $x(t)$. Для её решения необходимо иметь ещё одно уравнение. Учитывая зашумлённость реальных сигналов $y_1(t)$, $y_2(t)$ при воздействии на них шума $\mu(t)$, третье уравнение (уравнение связи) представим в виде регрессионной зависимости между сигналами $y_2(t)$, $y_1(t)$:

$$y_2(t) = b_0 + b_1 y_1(t) + \dots + b_m y_1^m(t), \quad (10)$$

где коэффициенты $b_0, b_1, \dots, b_m$ находятся при обработке результатов временных отсчётов

$$[y_2(t_i), y_1(t_i)], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad N > m+1 \quad (11)$$

методом наименьших квадратов (МНК).

Для нахождения взаимосвязи между коэффициентами $b_0, b_1, \dots, b_m$ и параметрами $a_0(\xi)$, $a_1(\xi)$ выразим входной сигнал $x(t)$ в формуле (7) через $y_1(t)$, $a_0(\xi)$, $a_1(\xi)$ и подставим его в выражение (10):

$$y_2 = a_0(\xi) + (y_2(t) - a_0(\xi))^m / a_1^{m-1}(\xi). \quad (12)$$

Используем в (12) формулу биномиального разложения Ньютона:

$$\begin{aligned} y_2(t) = a_0(\xi) + \frac{(-1)^m a_0^m(\xi)}{a_1^{m-1}(\xi)} + \\ + \sum_{i=1}^m (-1)^{m-i} C_m^{m-i} a_0^{m-i}(\xi) y_1(t) / a_1^{m-1}(\xi), \end{aligned} \quad (13)$$

где $C_m^{m-i} = m! / [(m-i)!i!]$ – число сочетаний из m по $(m-i)$, где i изменяется от 1 до m .

Соотношение (13) позволяет определить взаимосвязь между оценками $b_0, b_1, \dots, b_m$ и оценками $a_0(\xi)$, $a_1(\xi)$:

$$\begin{cases} \hat{b}_0 = \hat{a}_0 + (-1)^m \hat{a}_0^m / \hat{a}_1^{m-1}, \\ \hat{b}_i = (-1)^{m-i} C_m^{m-i} \hat{a}_0^{m-i} / \hat{a}_1^{m-i}, \end{cases} \quad (14)$$

где $i = 1, \dots, m$.

Найдём искомые $\hat{a}_0, \hat{a}_1$ по оценкам коэффициентов $b_0, b_1, \dots, b_m$ и с помощью системы двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \hat{b}_j &= f(\hat{a}_0, \hat{a}_1), \quad 0 \leq j \leq m; \\ \hat{b}_k &= g(\hat{a}_0, \hat{a}_1), \quad j \neq k, \quad 0 \leq k \leq m. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Например, для $m=2$ оценки коэффициентов b_0, b_1, b_2 связаны с оценками параметров $a_0(\xi), a_1(\xi)$ следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \hat{b}_0 &= \hat{a}_0 + \hat{a}_0^2 / \hat{a}_1; \\ \hat{b}_1 &= -2\hat{a}_0 / \hat{a}_1; \\ \hat{b}_2 &= \hat{a}_1^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Из (16) получим

$$\hat{a}_1 = \hat{b}_2^{-1}; \quad \hat{a}_0 = -\hat{b}_1 / (2\hat{b}_2). \quad (17)$$

Таким образом, вычислив коэффициенты $b_0, b_1, \dots, b_m$ в выражении (10), можно определить текущие параметры $a_0(\xi), a_1(\xi)$ основного канала СИД с помощью (14), (15) (выражения (16), (17) для $m=2$) и, подставив их в (7), точно оценить входной сигнал с помощью выражения

$$\hat{x}(t) = [y_1(t) - \hat{a}_0(\xi)] / \hat{a}_1(\xi). \quad (18)$$

Как следует из (8), в данном случае будут скорректированы аддитивная и мультипликативная погрешности датчика за счёт устранения дрейфа нуля и дрейфа коэффициента чувствительности соответственно [8].

Расстояние между временными отсчётами ($t_i - t_{i-1}$) выбирается из условия, что за время наблюдения (идентификации) $T_n = t_N - t_1$ параметры $a_0(\xi), a_1(\xi)$ практически не изменятся. При этом точность расчёта величин b_i, a_0, a_1 и, соответственно, сигнала $\hat{x}(t)$ повышается с ростом динамики сигналов $y_1(t), y_2(t)$, так как в этом случае уменьшается ковариационная матрица МНК-оценок $b_i, i=0, 1, \dots, m$.

Построение интеллектуальных датчиков на основе предварительного функционального преобразования. Значение $\hat{x}(t)$, вычисленное с помощью (18), можно использовать в качестве более точного (образцового) значения входного сигнала $x(t)$ при метрологическом самоконтроле

по сравнению со значением входного сигнала, вычисленного с использованием номинальных параметров $a_{0н}, a_{1н}$:

$$x_n(t) = [y_1(t) - a_{0н}] / a_{1н}. \quad (19)$$

На рис. 1 показана упрощённая схема интеллектуального минимально-избыточного датчика, построенного на основе СИД и вычислений с помощью выражений (10), (11), (17)–(19) при воздействии на СИД неизвестных ДФ $\xi(t)$ и выходного шума $\mu(t)$. Условием идентифицируемости параметров $a_0(\xi), a_1(\xi)$ при неизвестном входном сигнале $x(t)$ является неравенство нулю определителя информационной матрицы Фишера МНК-оценок коэффициентов $b_0, b_1, \dots, b_m$ в выражении (10) [9].

В процессе метрологического самоконтроля в блоке самоконтроля интеллектуального датчика могут вычисляться и сравниваться с заданными допусками как абсолютная $\Delta_n(t) = x_n(t) - \hat{x}(t)$ или среднеквадратическая погрешности (СКП) σ_x измерения входного сигнала $x(t)$, так и допустимые значения дрейфа нуля $\Delta a_0(\xi) = a_0(\xi) - a_{0н}$ и дрейфа коэффициента чувствительности $\Delta a_1(\xi) = a_1(\xi) - a_{1н}$. Кроме того, может оцениваться и сравниваться с допустимыми пределами остаточная погрешность расчёта $\hat{x}(t)$. На рис. 2 представлены зависимости СКП γ_x оценки $\hat{x}(t)$ входной величины $x(t)$ с помощью (18), приведённой к шкале L сигнала $x(t)$, $g_x = s_x / L$, от среднеквадратического приведённого значения γ_μ шума измерений $\mu(t)$, $g_\mu = s_\mu / L$, приведённого

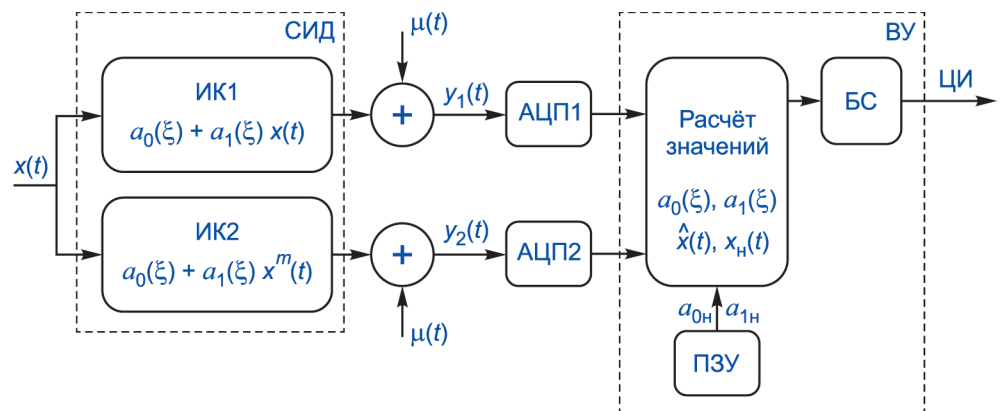


Рис. 1. Схема интеллектуального минимально-избыточного датчика; СИД – структурно-избыточный датчик; ИК1, ИК2 – измерительные каналы; АЦП1, АЦП2 – аналого-цифровые преобразователи; ВУ – вычислительное устройство; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; БС – блок самоконтроля; ЦИ – цифровой интерфейс; $x(t)$ – входной сигнал; a_0, a_1 – параметры интеллектуального датчика; ξ – дестабилизирующие факторы; $\mu(t)$ – выходной шум; $y_1(t), y_2(t)$ – выходной сигнал; $\hat{x}(t)$ – оценка входного сигнала

Fig. 1. Intelligent minimum redundancy sensor circuit: CID – measuring sensor; IR – measuring channel; ADC – analog-to-digital converter; VU – Computing device; ROM – read-only memory; $x(t)$ – the input signal; a_0, a_1 – parameters of the measuring sensor; ξ – factors of the de-stabilizing effect; $\mu(t)$ – the output noise; $y_1(t), y_2(t)$ – the output signal; $\hat{x}(t)$ – evaluation of the input signal

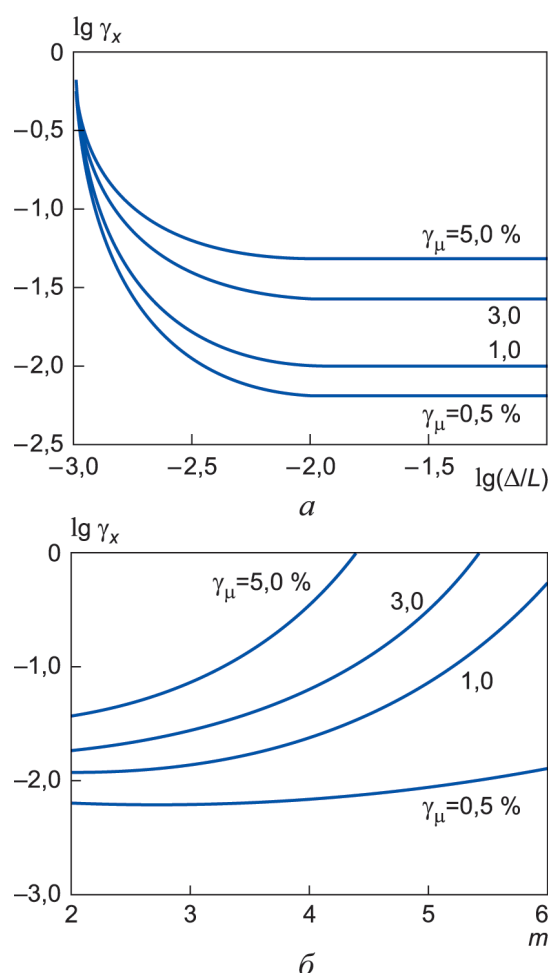


Рис. 2. Зависимость средней квадратической погрешности γ_x измерений от приведённой динамики Δ/L изменения входного сигнала (а) и степени нелинейности m предварительного функционального преобразования (б) при различных среднеквадратических приведённых значениях γ_μ шума измерений

Fig. 2. Dependence of the root-mean-square measurement error γ_x on the reduced dynamics Δ/L of the input signal change (a) and the power of nonlinearity m of the preliminary functional transformation (b) at different root-mean-square reduced values γ_μ of the measurement noise

динамики изменения входного сигнала Δ/L и степени нелинейности m предварительного функционального преобразования в дополнительном измерительном канале СИД. Для большей наглядности графики изображены в логарифмическом масштабе.

В ходе исследований выявлено, что форма и спектр сигнала $x(t)$ на точность идентификации влияют несущественно, в процессе идентификации интервал наблюдения T_n необходимо выбирать так, чтобы динамика выходного (входного) сигнала $\Delta/L \geq 0,01$ (1 %). Результаты моделирования показали, что наилучшая точность идентификации обеспечивается при степени нелинейности в дополнительном измерительном канале СИД $m=2$. Это объясняется

тем, что при $m > 2$ ухудшается обусловленность информационной матрицы МНК-оценок искомых параметров, причём рост данной составляющей суммарной погрешности при увеличении m значительно опережает уменьшение составляющей погрешности за счёт увеличения степени некоммутативности (асимметрии) операторов основного и дополнительного каналов СИД.

В заключение следует отметить, что возможности создания нелинейных измерительных каналов в датчиках существуют практически для каждого вида измерений, основанного на том или ином физическом принципе [10, 11]. Так, ёмкостные датчики с различным числом статорных пластин относительно роторных позволяют реализовать не только линейные характеристики, но и любые другие, в том числе и степенные. Как известно, ёмкостные датчики широко используются при измерении геометрических параметров (длины, размера, перемещения), кинематических величин (пути, скорости, ускорения линейного и вращательного движения, числа оборотов в единицу времени), динамических параметров (силы, давления в жидкостях и газах и др.).

При измерениях параметров магнитного поля Земли с помощью магнитометров, основанных на магниторезистивном эффекте или эффекте Гаусса, их выходная величина (относительное изменение удельного сопротивления магниторезистора) изменяется по точному квадратичному закону от входного воздействия (магнитной индукции).

Нелинейные функции преобразования могут быть реализованы в потенциометрических датчиках, что достигается соответствующим изменением профиля каркаса, на который наматывается проволока. Нелинейный характер в виде квадратичного полинома имеет зависимость сопротивления полупроводниковых и металлоплёночных тензопреобразователей от деформации. Аналогичную характеристику имеют вольфрамовые термометры сопротивления и т. д.

Заключение. Анализ полученных результатов показывает, что применение интеллектуальных датчиков на основе предварительного функционального преобразования входного сигнала позволяет построить интеллектуальную измерительную систему с высокой степенью метрологической надёжности и не допустить дрейфа метрологических характеристик измерительной системы за пределы допустимых значений.

Список литературы

1. Мищенко С. В., Цветков Э. И., Чернышова Т. И. Метрологическая надёжность измерительных средств: монография. М.: Машиностроение, 2001. 96 с.
2. Чернышова Т. И., Полухин В. И. Метод повышения метрологического ресурса средств неразрушающего контроля // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2011. № 3(34). С. 405–411.
3. Белозубов Е. М., Васильев В. А., Чернов П. С. Метрологический самоконтроль интеллектуальных датчиков измерительных и управляющих систем // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 11–17.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-7-11-17>

4. Singh V. R., *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, January 2005, vol. 43, pp. 7–16 (in Indian).
5. Петров Б. Н., Викторов В. А., Лункин Б. В. Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: Наука, 1976. 244 с.
6. Белорусец В. Б. Метод вспомогательных систем для идентификации динамических объектов при неизвестном входном сигнале // Автоматика и телемеханика. 1981. № 8. С. 76–82.
7. Marshall J. E., *Electronic Letters*, 1977, vol. 13, no. 18, pp. 539–540. <http://dx.doi.org/10.1049/el:19770388>
8. А.с. 399792 СССР. № 4725013/24. Телеметрическое устройство / Козырев Г. И., Ефремов О. Н., Жучков А. И., Степанов В. С. // Бюл. № 20 от 30.05.88.
9. Козырев Г. И., Шкляр С. В., Назаров А. В. Метод текущей идентификации измерительных систем на основе предварительного функционального преобразования // Автоматика и вычислительная техника. 2000. № 6. С. 22–28.
10. Аш Ж., Андре П., Бофрон Ж. и др. Датчики измерительных систем. М.: Мир, 1992. ч. 1. 480 с., ч. 2. 419 с.
11. Багдатыев Е. Е., Чернышов Ю. Н. Датчиковая аппаратура информационно-измерительных систем. М.: Московский государственный университет леса, 2008. 64 с.

References

1. Mishhenko S. V., Cvetkov Je. I., Chernyshova T. I., *Metrologicheskaja nadezhnost' izmeritel'nykh sredstv* [Metrological reliability of measuring instruments], Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2001, 96 p. (in Russian).
2. Chernyshova T. I., Poluhin V. I., The method of increasing the metrological resource of non-destructive testing equipment,

Journal Problems of Contemporary Science and Practice Vernadsky University, 2011, no. 3(34), pp. 405–411 (in Russian).

3. Belozubov E. M., Vasil'ev V. A., Chernov P. S., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 7, pp. 660–669. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1481-7>
4. Singh V. R., *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, January 2005, vol. 43, pp. 7–16 (in Indian).
5. Petrov B. N., Viktorov V. A., Lunkin B. V., *Printsip invariančnosti v izmeritel'noi tekhnike* [The principle of invariance in measurement technology], Moscow, Nauka Publ., 1976, 244 p. (in Russian).
6. Belorusetz V. B., *Autom. Remote Control*, 42:8 (1981), 1056–1061.
7. Marshall J. E., *Electronic Letters*, 1977, vol. 13, no. 18, pp. 539–540. <http://dx.doi.org/10.1049/el:19770388>
8. USSR copyright certificate no. 1399792. № 4725013/24. Telemetriceskoe ustroistvo [Telemetry device], Kozыrev G. I., Efremov O. N., Zhuchkov A. I., Stepanov V. S., no. 20 05/30/88 (in Russian).
9. Kozыrev G. I., Shkljar S. V., Nazarov A. V., *Automatic Control and Computer Sciences*, 2000, no. 6, pp. 22–28 (in Russian).
10. Ash Zh., Andre P., Boforon Zh., *Sensors of measuring systems*, Moscow, Mir Publ., 1992. 429 p.
11. Bagdat'ev E. E., Chernyshov Yu. N., *Datchikovaya apparatura informatsionno-izmeritel'nykh sistem* [Sensor equipment of information measuring systems], Moscow, State Forest University Publ., 2008, 64 p. (in Russian).

Дата поступления: 23.06.2020.

Дата принятия: 02.07.2020.

Synthesis of smart sensors based on the introduction of minimal structural redundancy

Gennady I. Kozыrev, Andrei V. Nazarov, Vladimir S. Soldatenko, Valentin D. Usikov

Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia, vka@mail.ru

The problems of operation of measuring systems and changes in their parameters due the influence of various kinds of destabilizing factors, including time, are considered, and the primary elements of the measuring path – sensors and converting equipment – are most susceptible to such an influence. The deviation of the values of the parameters of the measurers from the nominal values leads to significant errors in the assessment of the unknown input signal, which necessitates the current (during operation) identification of the measurer. The problem of the current identification of the measurer parameters under unknown input influences is solved. The identification procedure is carried out by introducing an additional channel for transforming the measured value in the spatial domain. In this case, the transformation of the measured value in the additional channel of the structurally redundant measurer has the form of a preliminary functional (nonlinear) transformation of the m -th power over the input signal. The solution to the current identification problem is considered for the linear static characteristic of the main channel of the measuring transducer. An additional equation in solving the problem of current identification and conducting metrological self-control in an intelligent sensor is presented in the form of a regression relationship between the output signals of the additional and main channels of the structurally redundant measurer. The unknown parameters of the regression equation are determined from the results of processing the time samples of the output signals of the additional and main channels using the least squares method. The dependences of the rms measurement error of the input quantity on the rms value of the measurement noise in the output signals of the structurally redundant measurer, the dynamics of the input signal change and the power of nonlinearity m of the preliminary functional transformation in the additional measuring channel are presented. In the course of research, it was revealed that the shape and spectrum of the input signal do not significantly affect the measurement accuracy. It is shown that the highest measurement accuracy is provided by the preliminary quadratic ($m = 2$) conversion of the input signal in the additional channel of the minimum-redundant sensor. The research results can be used for metrological self-control in smart sensors or smart measuring systems.

Key words: destabilizing factors, identification, preliminary functional transformation, regression, metrological self-control.