

ному числу матрицы парных сравнений, что приводит к обременению матрицы дополнительными требованиями. Предложенный алгоритм даёт возможность на практике исключить дополнительные ограничения при ранжировании альтернатив методом парных сравнений, которые возникают из-за использования традиционного алгоритма.

#### Л и т е р а т у р а

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993.
2. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991.
3. Харитонов Е. В. Метод согласования результатов субъективных измерений // Измерительная техника. 2000. № 4. С. 45–48.
4. Харитонов В. А., Харитонов Е. В. Новые способы

преобразования форм представления субъективных измерений // Измерительная техника. 2002. № 1. С. 2–32.

5. Сысоев Ю. С., Гилт И. Ю., Винниченко С. М. Использование метода оптимальных групповых стратегий для согласования результатов субъективных измерений // Измерительная техника. 2006. № 2. С. 20–22.

6. Сысоев Ю. С., Магдеев В. Ш., Воронин Е. П. Исследования восприятия текстовой информации со световых взрывозащищенных табло методами субъективных измерений // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 6. С. 43–49.

7. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980.

8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 2001.

Дата принятия: 10.04.2018.

## ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

681.586.075

### Метрологический самоконтроль интеллектуальных датчиков измерительных и управляющих систем

Е. М. БЕЛОЗУБОВ<sup>1</sup>, В. А. ВАСИЛЬЕВ<sup>2</sup>, П. С. ЧЕРНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия,

<sup>2</sup>Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: pvlvp@yandex.ru

*Рассмотрены основные структурные блоки и функциональные возможности интеллектуальных датчиков. Предложена реализация функции метрологического диагностического самоконтроля датчиков с мостовой измерительной схемой. Исследован адаптивный тензорезисторный датчик давления на основе нано- и микроэлектромеханической системы.*

**Ключевые слова:** интеллектуальный датчик, наноэлектромеханическая система, микроэлектромеханическая система, самоконтроль, управление.

*The various Russian and foreign definitions of smart (intellectual) sensor, its structure and functions are discussed. Implementation of metrological self-checking function in bridge-based sensors is given along with an example of adaptive strain gauge pressure sensor based on nano- and microelectromechanical system.*

**Key words:** smart sensor, nanoelectromechanical systems, micro, self-monitoring, management.

В настоящее время информационные и коммуникационные технологии уверенно внедряются во все сферы жизнедеятельности человека. В связи с этим на мировых рынках на протяжении уже многих лет наблюдается увеличение спроса на датчики. Одновременно возрастают и предъявляемые к ним требования. Широкое распространение получают так называемые интеллектуальные датчики (ИД) (smart sensors). В зарубежной литературе существует несколько определений данного термина [1]. С технологической точки зрения ИД – это совокупность первичных и промежуточных измерительных преобразо-

вателей (сенсоров), вторичных преобразователей (усилителей, аналого-цифровых преобразователей (АЦП), мультиплексоров), блоков обработки сигнала (микроконтроллеров, цифровых сигнальных процессоров), цифрового интерфейса и других узлов, интегрированных в одном корпусе или системе на кристалле. С позиций функциональности под ИД понимают интеллектуальные функции самоидентификации, самоконтроля, самовосстановления, самокалибровки и автоматической компенсации погрешностей, реализацию алгоритмов совместной работы в сети датчиков, поддержку определённых цифровых

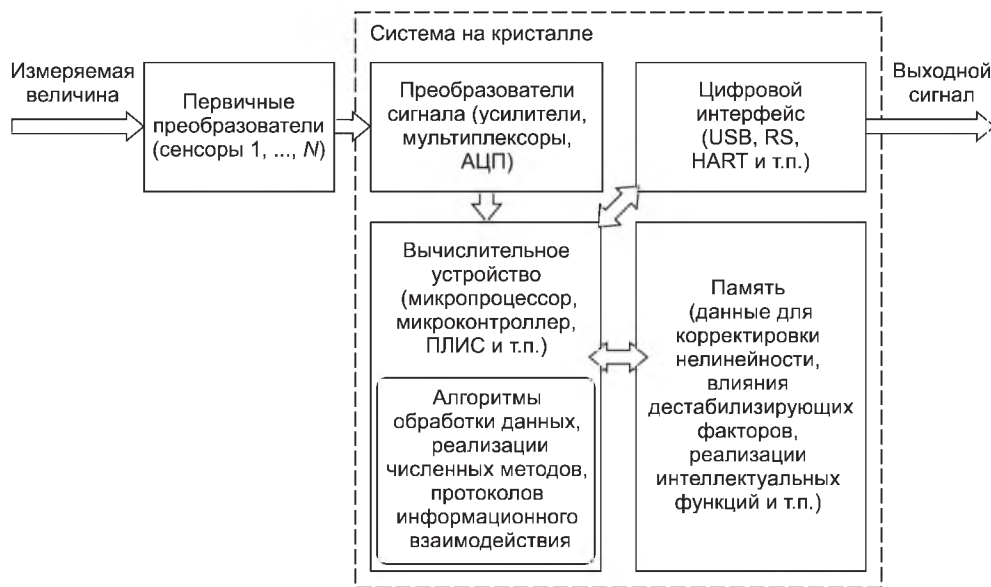


Рис. 1. Основные структурные блоки интеллектуального датчика:  
ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

стандартов информационного взаимодействия и т. д. Развитие терминологии в области интеллектуальных средств измерений изложено в работе [2]. В России данный аспект регламентируется государственным стандартом [3], согласно которому ИД – адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля.

Структурная схема ИД представлена на рис. 1. Аналоговые сигналы поступают от измерительных преобразователей, после чего конвертируются в цифровую форму вторичными преобразователями сигналов. Вычислительное устройство, состоящее из микропроцессора, микроконтроллера и цифрового сигнального процессора, использует хранящиеся в запоминающем устройстве данные для учёта нелинейности, дрейфа нуля, влияния дестабилизирующих факторов, старения и др., корректирует поступившие от сенсоров значения измеряемой величины, а затем приводит их к требуемым единицам измерения. Алгоритмы, отвечающие за взаимодействие в сети, самоидентификацию и реализацию других интеллектуальных возможностей, также реализуются в цифровой части датчика.

Передача сигнала, содержащего информацию об измеряемой величине и служебных данных, осуществляется посредством цифрового интерфейса с применением того или иного коммуникационного протокола (USB, RS-485, HART и т. п.) или стандарта промышленных сетей (Profibus, DeviceNet, Interbus, Fieldbus, CANbusLIN, Modbus и др.) [4]. В настоящее время популярность набирают специализированные группы стандартов для ИД, такие как IEEE 1451. С помощью коммуникационных протоколов через цифровой интерфейс реализуются функции калибровки, запроса и получения информации о текущем состоянии сенсоров и ИД в целом. Датчики, реализующие спецификации стандартов IEEE 1451, предназначены для работы в сети

и организации доступа к предоставляемой информации через абстрактные уровни информационного взаимодействия [5].

Метрологический самоконтроль является неотъемлемой функцией ИД и согласно стандарту [6] должен обеспечивать оценку метрологической исправности датчика с определением статуса результата измерений. В данной работе на примере датчика давления предложен вариант реализации функции метрологического самоконтроля датчиков физических величин (силы, перемещения, температуры и др.) с тензопреобразователем в виде мостовой измерительной цепи. В тонкоплёночных тензорезисторных датчиках давления первичный преобразователь

обычно выполняют в виде нано- и микроэлектромеханической системы (НиМЭМС), которая имеет гетерогенную структуру из тонких плёнок разнородных материалов, сформированную на упругом элементе определённой геометрии [7].

На рис. 2 показан датчик давления, содержащий гетерогенную структуру НиМЭМС 6 на упругом элементе в виде мембраны 5 с жёстким центром 4. Увеличение давления приводит к деформации упругого элемента и изменению электрического сигнала, поступающего с НиМЭМС через соединительные проводники 2 на выводные колки 1 датчика. Возникновение погрешности в процессе эксплуатации таких датчиков обусловлено следующими факторами [8]:

- изменением характеристик материалов и узлов конструкции (модуля упругости материала упругого элемента, сопротивления тензозлементов и т. д.);

- повреждениями в процессе эксплуатации (деформацией материала упругого элемента, изменением характера механических напряжений);

- эрозионным износом, коррозией (выходом электрических параметров за установленные нормы, обрывами металлизации и выводов);

Кроме того, в случае ИД дополнительные погрешности вносят АЦП и предварительные усилители, некорректные алгоритмы цифровой обработки сигнала, погрешности выбора и аппроксимации функций преобразования, ограничения разрядности микроконтроллеров [9].

Критическая составляющая погрешности обусловлена изменениями характеристик именно чувствительных элементов, а не цифрового блока (за исключением случаев его отказа или некорректной реализацией алгоритмов) и зависит от конкретного типа датчика и условий его эксплуатации. Со временем асимметрия вклада в результирующую

погрешность составляющих от тех или иных элементов конструкции сенсора возрастает, что сказывается на электрических сигналах, снимаемых с мостовой схемы. Это может быть ассиметричная деформация упругого элемента, неравномерное старение тензоземента, коррозия какого-либо контакта, отклонения электрических параметров в связи с несовершенством технологического процесса производства и т. д.

При выполнении НиМЭМС в виде мостовой измерительной схемы с четырьмя рабочими тензорезисторами и отсутствии элементов термокомпенсации выходной сигнал НиМЭМС в стационарном температурном режиме можно представить как

$$U = E \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

где  $E$  – напряжение питания мостовой измерительной схемы;  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – сопротивления тензорезисторов.

Проведя необходимые преобразования, запишем

$$U = E(R_2 R_4 - R_1 R_3) [(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)]^{-1}. \quad (1)$$

Определим условие временной стабильности НиМЭМС в виде выражения

$$U(\tau + \Delta\tau) = U(\tau), \quad (2)$$

где  $U(\tau + \Delta\tau)$ ,  $U(\tau)$  – начальные выходные сигналы в моменты времени  $\tau + \Delta\tau$ ,  $\tau$ , соответственно;  $\Delta\tau$  – любой интервал времени в пределах срока службы датчика.

После подстановки выражения (1) в выражение (2) и обеспечения необходимой стабильности источника питания  $E(\tau + \Delta\tau) = E(\tau)$ , получим условие стабильности НиМЭМС в развернутом виде:

$$\begin{aligned} \frac{R_2(\tau + \Delta\tau)R_4(\tau + \Delta\tau) - R_1(\tau + \Delta\tau)R_3(\tau + \Delta\tau)}{[R_1(\tau + \Delta\tau) + R_2(\tau + \Delta\tau)] \times [R_3(\tau + \Delta\tau) + R_4(\tau + \Delta\tau)]} = \\ = \frac{R_2(\tau)R_4(\tau) - R_1(\tau)R_3(\tau)}{[R_1(\tau) + R_2(\tau)] \times [R_3(\tau) + R_4(\tau)]} \end{aligned} \quad (3)$$

Анализ условия (3) показывает, что с точки зрения математики стабильность НиМЭМС можно обеспечить при бесчисленном множестве сочетаний сопротивлений тензорезисторов и их функциональных зависимостей от времени. В то же время при неравенстве сопротивлений различных тензорезисторов мостовой схемы НиМЭМС любые сочетания потребуют для выполнения условий стабильности различных, взаимосвязанных и точных функциональных зависимостей сопротивлений тензорезисторов от времени. Аналогично, если функциональные зависимости тензорезисторов не зависят от времени, то для выполнения условий стабильности различных и взаимосвязанных сопротивлений тензорезисторов требуется их функциональная зависи-

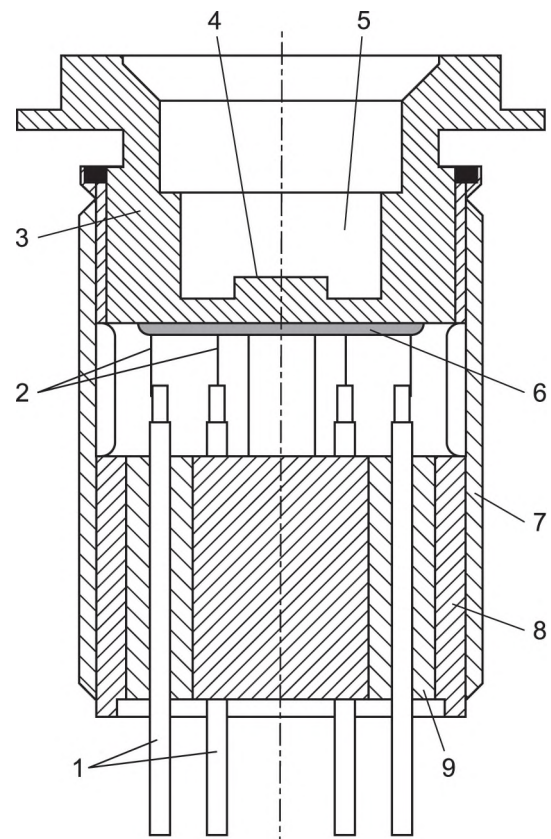


Рис. 2. Датчик давления на основе нано- и микроэлектромеханической системы с гетерогенной структурой:

1 – выводные колки; 2 – соединительные проводники; 3 – основание упругого элемента; 4 – жесткий центр мембраны; 5 – мембрана; 6 – гетерогенная структура нано- и микроэлектромеханической системы; 7, 9 – герметизирующая и диэлектрическая втулки, соответственно; 8 – контактная колодка

мость от времени. Учитывая, что такие функциональные зависимости трудно реализуемы, с практической точки зрения оптимальными являются частные условия стабильности в виде равенства сопротивлений тензорезисторов в начальный момент времени, а также одинаковые функциональные зависимости этих сопротивлений от времени:

$$R_1(\tau) = R_2(\tau) = R_3(\tau) = R_4(\tau) = R(\tau); \quad (4)$$

$$R_1(\tau + \Delta\tau) = R_2(\tau + \Delta\tau) = R_3(\tau + \Delta\tau) = R_4(\tau + \Delta\tau) = R(\tau + \Delta\tau), \quad (5)$$

где  $R(\tau)$ ,  $R(\tau + \Delta\tau)$  – сопротивления тензорезисторов в различные моменты времени вне зависимости от номера тензорезистора в мостовой схеме.

Тогда соотношения (4), (5) можно записать в сокращенном виде:

$$R_j(\tau) = R(\tau); R_j(\tau + \Delta\tau) = R(\tau + \Delta\tau).$$

Проанализировав взаимосвязи тонкопленочных элементов тензорезистора (диэлектрического, тензорезистив-

ного, адгезионного и контактного слоёв), определим сопротивление  $j$ -го тонкоплёночного тензорезистора в моменты времени  $\tau$ ,  $\tau + \Delta\tau$ , соответственно:

$$R_j(\tau) = R_{Tj}(\tau) + 2R_{T-aj}(\tau) + 2R_{aj}(\tau) + 2R_{a-кj}(\tau) + 2R_{кj}(\tau) + 2R_{к-пj}(\tau) + 2R_{пj}(\tau); \quad (6)$$

$$R_j(\tau + \Delta\tau) = R_{Tj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{T-aj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{aj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{a-кj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{кj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{к-пj}(\tau + \Delta\tau) + 2R_{пj}(\tau + \Delta\tau), \quad (7)$$

где  $R_{Tj}$ ,  $R_{aj}$ ,  $R_{кj}$ ,  $R_{пj}$  – соответственно сопротивления тензорезистивного, адгезионного, контактного, проводящего элементов  $j$ -го тензорезистора;  $R_{T-aj}$ ,  $R_{a-кj}$ ,  $R_{к-пj}$  – соответственно сопротивления переходов элементов тензорезистивный–адгезионный, адгезионный–контактный, контактный–проводящий  $j$ -го тензорезистора.

Существуют различные модели расчёта, позволяющие с достаточной точностью находить сопротивления элементов тонкоплёночных резисторов в зависимости от размеров элементов. В общем случае сопротивление каждого элемента тонкоплёночного тензорезистора полностью определяется удельным поверхностным сопротивлением, а также эффективными длиной и шириной элемента или перехода. Экспериментальные исследования длительного влияния внешних воздействующих факторов на тонкоплёночные тензорезисторные датчики давления показали, что в наибольшей степени на параметры, определяющие сопротивление, влияют деформации, вариации температуры и времени. Поэтому в соответствии с выражениями (6), (7) математические модели сопротивлений тонкоплёночных тензорезисторов можно представить в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned} R_j(\tau) = & \frac{\rho_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau) l_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau)}{b_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau) l_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau)}{b_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau) l_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau)}{b_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{кj}(\varepsilon_{кj}, T_{кj}, \tau) l_{кj}(\varepsilon_{кj}, T_{кj}, \tau)}{b_{кj}(\varepsilon_{кj}, T_{кj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{к-пj}(\varepsilon_{к-пj}, T_{к-пj}, \tau) l_{к-пj}(\varepsilon_{к-пj}, T_{к-пj}, \tau)}{b_{к-пj}(\varepsilon_{к-пj}, T_{к-пj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{пj}(\varepsilon_{пj}, T_{пj}, \tau) l_{пj}(\varepsilon_{пj}, T_{пj}, \tau)}{b_{пj}(\varepsilon_{пj}, T_{пj}, \tau)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_j(\tau + \Delta\tau) = & \frac{\rho_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau + \Delta\tau) l_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau + \Delta\tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau + \Delta\tau) l_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau + \Delta\tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau + \Delta\tau) l_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau + \Delta\tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{а-кj}(\varepsilon_{а-кj}, T_{а-кj}, \tau + \Delta\tau) l_{а-кj}(\varepsilon_{а-кj}, T_{а-кj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{а-кj}(\varepsilon_{а-кj}, T_{а-кj}, \tau + \Delta\tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{кj}(\varepsilon_{кj}, T_{кj}, \tau + \Delta\tau) l_{кj}(\varepsilon_{кj}, T_{кj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{кj}(\varepsilon_{кj}, T_{кj}, \tau + \Delta\tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{к-пj}(\varepsilon_{к-пj}, T_{к-пj}, \tau + \Delta\tau) l_{к-пj}(\varepsilon_{к-пj}, T_{к-пj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{к-пj}(\varepsilon_{к-пj}, T_{к-пj}, \tau + \Delta\tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{пj}(\varepsilon_{пj}, T_{пj}, \tau + \Delta\tau) l_{пj}(\varepsilon_{пj}, T_{пj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{пj}(\varepsilon_{пj}, T_{пj}, \tau + \Delta\tau)}, \end{aligned}$$

где  $\rho_{Tj}$ ,  $\rho_{T-aj}$ ,  $\rho_{aj}$ ,  $\rho_{а-кj}$ ,  $\rho_{кj}$ ,  $\rho_{к-пj}$ ,  $\rho_{пj}$  – эффективное удельное поверхностное сопротивление соответствующих элементов и переходов;  $l_{Tj}$ ,  $l_{T-aj}$ ,  $l_{aj}$ ,  $l_{а-кj}$ ,  $l_{кj}$ ,  $l_{к-пj}$ ,  $l_{пj}$  – эффективная длина соответствующих элементов и переходов;  $b_{Tj}$ ,  $b_{T-aj}$ ,  $b_{aj}$ ,  $b_{а-кj}$ ,  $b_{кj}$ ,  $b_{к-пj}$ ,  $b_{пj}$  – эффективная ширина соответствующих элементов и переходов  $j$ -го тензорезистора;  $\varepsilon_{Tj}$ ,  $\varepsilon_{T-aj}$ ,  $\varepsilon_{aj}$ ,  $\varepsilon_{а-кj}$ ,  $\varepsilon_{кj}$ ,  $\varepsilon_{к-пj}$ ,  $\varepsilon_{пj}$  – относительная деформация, воздействующая на соответствующие элементы и переходы;  $T_{Tj}$ ,  $T_{T-aj}$ ,  $T_{aj}$ ,  $T_{а-кj}$ ,  $T_{кj}$ ,  $T_{к-пj}$ ,  $T_{пj}$  – температура, воздействующая на соответствующие элементы и переходы;  $j=1, 2, 3, 4$  – номер тензорезистора в мостовой схеме.

Тогда расширенные частные условия стабильности НМЭС представим как

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau) l_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau)}{b_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau) l_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau)}{b_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau) l_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau)}{b_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{кj}(\varepsilon_{кj}, T_{кj}, \tau) l_{кj}(\varepsilon_{кj}, T_{кj}, \tau)}{b_{кj}(\varepsilon_{кj}, T_{кj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{к-пj}(\varepsilon_{к-пj}, T_{к-пj}, \tau) l_{к-пj}(\varepsilon_{к-пj}, T_{к-пj}, \tau)}{b_{к-пj}(\varepsilon_{к-пj}, T_{к-пj}, \tau)} + \\ & + \frac{2\rho_{пj}(\varepsilon_{пj}, T_{пj}, \tau) l_{пj}(\varepsilon_{пj}, T_{пj}, \tau)}{b_{пj}(\varepsilon_{пj}, T_{пj}, \tau)} = R(\tau); \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\rho_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau + \Delta\tau) l_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{Tj}(\varepsilon_{Tj}, T_{Tj}, \tau + \Delta\tau)} + \\
 & + \frac{2\rho_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau + \Delta\tau) l_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{T-aj}(\varepsilon_{T-aj}, T_{T-aj}, \tau + \Delta\tau)} + \\
 & + \frac{2\rho_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau + \Delta\tau) l_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{aj}(\varepsilon_{aj}, T_{aj}, \tau + \Delta\tau)} + \\
 & + \frac{2\rho_{a-kj}(\varepsilon_{a-kj}, T_{a-kj}, \tau + \Delta\tau) l_{a-kj}(\varepsilon_{a-kj}, T_{a-kj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{a-kj}(\varepsilon_{a-kj}, T_{a-kj}, \tau + \Delta\tau)} + \\
 & + \frac{2\rho_{kj}(\varepsilon_{kj}, T_{kj}, \tau + \Delta\tau) l_{kj}(\varepsilon_{kj}, T_{kj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{kj}(\varepsilon_{kj}, T_{kj}, \tau + \Delta\tau)} + \\
 & + \frac{2\rho_{k-nj}(\varepsilon_{k-nj}, T_{k-nj}, \tau + \Delta\tau) l_{k-nj}(\varepsilon_{k-nj}, T_{k-nj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{k-nj}(\varepsilon_{k-nj}, T_{k-nj}, \tau + \Delta\tau)} + \\
 & + \frac{2\rho_{nj}(\varepsilon_{nj}, T_{nj}, \tau + \Delta\tau) l_{nj}(\varepsilon_{nj}, T_{nj}, \tau + \Delta\tau)}{b_{nj}(\varepsilon_{nj}, T_{nj}, \tau + \Delta\tau)} = R(\tau + \Delta\tau). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Полученные расширенные частные условия стабильности (8), (9) могут выполняться при бесчисленном множестве сочетаний сопротивлений элементов тензорезисторов и их функциональных зависимостей от деформаций, температуры и времени. По аналогии с предыдущими рассуждениями любые сочетания в случае неравенства сопротивлений элементов тензорезисторов мостовой схемы НиМЭМС и неидентичности их функциональных зависимостей от воздействующих факторов потребуют для выполнения расширенных частных условий стабильности различных, взаимосвязанных и точных функциональных зависимостей сопротивлений тензорезисторов. С учётом того, что такие функциональные зависимости очень трудно реализуемы, запишем частные условия стабильности НиМЭМС в следующем виде:  $\rho_{Tj} = \rho_{Tj}$ ,  $\varepsilon_{Tj} = \varepsilon_{Tj}$ ,  $T_{Tj} = T_{Tj}$ ,  $l_{Tj} = l_{Tj}$ ,  $b_{Tj} = b_{Tj}$ ,  $\rho_{T-aj} = \rho_{T-aj}$ ,  $\varepsilon_{T-aj} = \varepsilon_{T-aj}$ ,  $T_{T-aj} = T_{T-aj}$ ,  $l_{T-aj} = l_{T-aj}$ ,  $b_{T-aj} = b_{T-aj}$ ,  $\rho_{aj} = \rho_{aj}$ ,  $\varepsilon_{aj} = \varepsilon_{aj}$ ,  $T_{aj} = T_{aj}$ ,  $l_{aj} = l_{aj}$ ,  $b_{aj} = b_{aj}$ ,  $\rho_{a-kj} = \rho_{a-kj}$ ,  $\varepsilon_{a-kj} = \varepsilon_{a-kj}$ ,  $T_{a-kj} = T_{a-kj}$ ,  $l_{a-kj} = l_{a-kj}$ ,  $b_{a-kj} = b_{a-kj}$ ,  $\rho_{kj} = \rho_{kj}$ ,  $\varepsilon_{kj} = \varepsilon_{kj}$ ,  $T_{kj} = T_{kj}$ ,  $l_{kj} = l_{kj}$ ,  $b_{kj} = b_{kj}$ ,  $\rho_{k-nj} = \rho_{k-nj}$ ,  $\varepsilon_{k-nj} = \varepsilon_{k-nj}$ ,  $T_{k-nj} = T_{k-nj}$ ,  $l_{k-nj} = l_{k-nj}$ ,  $b_{k-nj} = b_{k-nj}$ ,  $\rho_{nj} = \rho_{nj}$ ,  $\varepsilon_{nj} = \varepsilon_{nj}$ ,  $T_{nj} = T_{nj}$ ,  $l_{nj} = l_{nj}$ ,  $b_{nj} = b_{nj}$ .

Если условно принять, что изготовление датчиков заканчивается в момент времени  $\tau$ , а эксплуатация – в момент времени  $(\tau + \Delta\tau)$ , то соотношения (8) и частные условия стабильности НиМЭМС являются условиями обеспечения стабильности при воздействии внешних факторов во время изготовления, а соотношения (9) и частные условия стабильности НиМЭМС – при воздействии внешних факторов в процессе эксплуатации. Таким образом, в результате предложенного структурно-факторного подхода можно сформулировать структурно-факторные условия стабильности тонкоплёночных НиМЭМС в виде необходимости обеспечения идентичности структур тонкоплёночных тензорезисторов, размеров и характеристик их элементов, а также идентичности деформаций и температур, воздействующих на эти элементы

при изготовлении и эксплуатации. Так как у всех известных НиМЭМС мембраны выполнены в виде симметричных фигур (круга, реже квадрата), и размещение температурных и деформационных полей на таких мембранах тоже симметричное, то обеспечение указанных выше условий возможно только при симметричном размещении тензоэлементов НиМЭМС на мембране. Соответственно, асимметрия элементов приводит к уменьшению временной стабильности. Причём критичного уменьшения временной стабильности можно достигнуть и при сравнительно небольшой асимметрии, например, при жёстких требованиях к временной стабильности, когда даже небольшое её уменьшение рассматривается как критическое.

Влияние асимметрии оценивается аналитически с учётом метода преобразования датчика. Для датчика давления на основе тензорезисторной НиМЭМС влияние асимметрии  $\Delta R_2$  по абсолютной величине можно оценить аналогично формуле (1):

$$U_a = E[(R_2 + \Delta R_2)R_4 - R_1R_3][(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)]^{-1}.$$

Перейти к относительным величинам можно, рассмотрев отношения  $U_a/U_{ном}$ , где  $U_a$  – абсолютное значение асимметрии;  $U_{ном}$  – номинальный выходной сигнал датчика.

В большинстве тензометрических датчиков давления сигнал снимается только с одной, в редких случаях – с двух диагоналей (при питании от источника тока). Например, датчик давления содержит тензорезисторный преобразователь давления с мостовой измерительной цепью, состоящей из тензорезисторов и подключённой к источнику тока [10]. Сигналы с питающей и измерительной диагоналей поступают на АЦП. Имеется вычислительное устройство в виде микроконтроллера, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и цифровой интерфейс. В процессе калибровки датчика сигналы, соответствующие напряжениям в измерительной и питающей диагоналях моста, регистрируются при контрольных значениях давления и температуры. Причём в процессе измерения регистрируются только те значения напряжений измерительной и питающей диагоналей, которые являются мерой давления и температуры. Во время калибровки данного датчика в ПЗУ записывается информация (полиномиальные коэффициенты аппроксимирующей зависимости), необходимая для последующего вычисления давления. Эта информация регистрируется исходя из значений напряжений измерительной и питающей диагоналей.

Согласно стандарту [3] датчик является адаптивным, поскольку в нём осуществляется автоматическая коррекция выходного сигнала с учётом влияния температуры. Однако это не ИД, так как отсутствует самоконтроль достоверности результата измерений. Метрологический самоконтроль возможен только при введении той или иной формы избыточности: структурной (пространственной), временной или функциональной (информационной), а также их комбинации [6, 11]. Структурная избыточность предполагает использование дополнительных мер и (или) преобразователей по сравнению с минимально необходимым их количеством. Функциональная избыточность подразумевает применение дополнительной зависимости между измеряемой величиной и выходным сигналом [12].

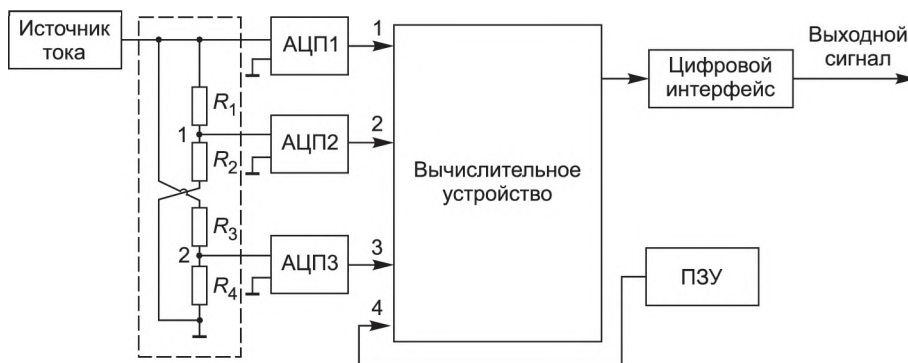


Рис. 3. Структурная схема интеллектуального датчика давления на основе нано- и микро-электромеханической систем:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

Реализовать метрологический диагностический самоконтроль рассмотренного адаптивного датчика можно путём снятия не двух, а трёх напряжений с мостовой измерительной схемы, используя дополнительные функциональные зависимости [13]. Таким образом, вводимая избыточность является комбинацией функциональной и структурной избыточности, когда задействован дополнительный АЦП. На рис. 3 изображена структурная схема ИД давления на основе НИМЭМС.

Первый АЦП снимает напряжение со всей мостовой схемы. Это напряжение при учёте питания источником постоянного тока пропорционально сопротивлению тензосхемы, служащей одновременно в качестве терморезистора. Данный сигнал необходим для автоматической компенсации температурной погрешности. В отличие от рассмотренного адаптивного датчика, где второе напряжение снимается с измерительной диагонали (см. рис. 3, точки 1, 2) и является мерой давления, в данном случае фиксируются потенциалы обоих узлов, что несёт избыточную информацию по

сравнению с одним напряжением, т. е. разностью этих потенциалов.

Вычислительное устройство состоит из блока преобразования кода АЦП в численное значение напряжения, блока расчёта численного значения давления и блока самоконтроля (рис. 4). В результате воздействия давления на датчик возникают деформации тензорезисторов, которые включены в мостовую измерительную цепь. Изменение сопротивлений тензорезисторов приводит к изменению потенциалов узлов 1, 2 измерительной диагонали. Напряжение питающей диагонали моста зависит от температуры тензорезисторного преобразователя. На выходе блока преобразования

кода АЦП в численное значение напряжения получают данные о трёх измеренных потенциалах, которые и подаются в блок расчёта численного значения давления. В этом блоке по данным, хранящимся в ПЗУ, вычисляется измеренное датчиком давление исходя из напряжений питающей (данные с АЦП 1) и измерительной (разность данных с АЦП 2, АЦП 3) диагоналей, т. е. без использования избыточности. Процесс полностью аналогичен рассмотренному для адаптивного датчика.

Найденное численное значение давления  $P$  передаётся на вход блока самоконтроля. Туда же приходят значения трёх измеренных потенциалов (узлов 1, 2 –  $U_1$ ,  $U_2$  и напряжения питающей диагонали  $U_n$ ) и данные с ПЗУ (см. рис. 4). Блок самоконтроля вычисляет потенциалы 1, 2 измерительной диагонали по найденным значениям напряжения питающей диагонали и вычисленного давления с помощью данных, полученных на этапе калибровки и хранящихся в ПЗУ. Далее в блоке самоконтроля сравниваются вычисленные и измеренные значения потенциалов узлов 1, 2. Если разница не превышает допустимого значения тестового критерия стабильности, то на выходе блока самоконтроля формируется значение давления, которое было получено в блоке расчёта численного значения давления. В противном случае на выход блока самоконтроля также передается сигнал, сообщающий о недостоверности найденного значения, и дополнительная служебная информация.

Таким образом, блоком самоконтроля производится обратная операция – контроль потенциалов узлов 1, 2 по уже известному значению давления, которое было вычислено с помощью минимально необходимой информации: напряжения измерительной (разности потенциалов узлов 1, 2) и питающей диагоналей.

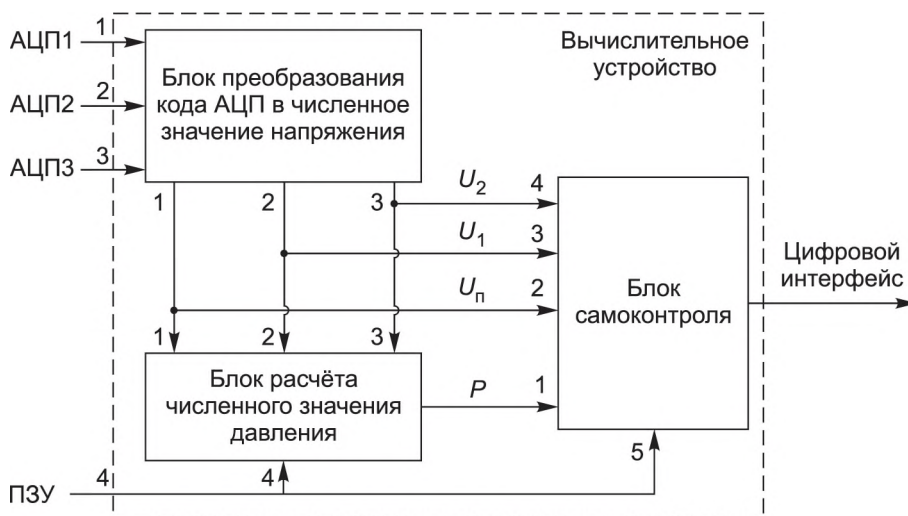


Рис. 4. Структурная схема вычислительного устройства интеллектуального датчика давления на основе нано- и микроэлектромеханической систем:

АЦП, ПЗУ – аналогично рис. 3

Отклонение вычисленных значений потенциалов 1, 2 от фактических служит мерой критической составляющей погрешности, обусловленной, как отмечено выше, неидентичными (ассимметричными) изменениями во времени характеристик различных элементов датчика.

Калибровка датчика осуществляется при регистрации всех потенциалов схемы, а именно напряжения питающей диагонали мостовой схемы, напряжений на тензорезисторах  $R_2$ ,  $R_4$  (потенциалов узлов 1, 2 измерительной диагонали) при установленных контрольных значениях давления и температуры, последующем вычислении и записи в ПЗУ определённых данных. Такие данные необходимы для выполнения следующих операций:

нахождения значения давления из значений напряжения питающей и измерительной диагоналей (для дальнейшего использования на этапе измерений блоком расчёта давления);

определения потенциалов узлов измерительной диагонали из напряжения питающей диагонали и давления (для применения на этапе самоконтроля).

Хранящимися в ПЗУ данными могут служить коэффициенты аппроксимирующего полиномиального выражения, данные для вычисления сплайн-интерполяции функций преобразования и т. п.

Предложенное авторами техническое решение, в отличие от большинства существующих и изложенных в [14–16], не приводит к значительному усложнению конструкции датчика и не содержит ресурсоёмких численных методов обработки сигналов. Такое решение основано на дополнительных зависимостях между измеряемой величиной и параметрами выходного сигнала НиМЭМС. Аналогичный подход может быть обобщён и применён, например, при измерении давления, в датчиках на основе нано- и микроэлектромеханических систем, а также в других датчиках информационно-измерительных систем [17–20].

#### Л и т е р а т у р а

1. **Yurish S. Y.** Sensors: Smart vs. Intelligent // *Sensors & Transducers*. 2010. V. 114. No. 3. P. 1–6.
2. **Taymanov R., Sapozhnikova K.** Problems of Terminology in the Field of Measuring Instruments with Elements of Artificial Intelligence // *Sensors & Transducers*. 2009. V. 102. No. 3. P. 51–61.
3. **ГОСТ Р 8.673–2009.** ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Термины и определения.
4. **Васильев В. А., Чернов П. С.** Интеллектуальные датчики, сети датчиков и цифровые интерфейсы // *Измерительная техника*. 2012. № 10. С. 3–6.
5. **Bröring A., Echterhoff J., Jirka S., Simonis I., Everding T., Stasch C., Liang S., Lemmens R.** New Generation Sensor Web Enablement // *Sensors*. 2011. № 11. P. 2652–2699.
6. **ГОСТ Р 8.734–2011.** ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.
7. **Белозубов Е. М., Васильев В. А., Громков Н. В.** Тонкоплёночные нано- и микроэлектромеханические системы — основа современных и перспективных датчиков давления для ракетной и авиационной техники // *Измерительная техника*. 2009. № 7. С. 35–38.
8. **Бушуев О. Ю.** Анализ возможных неисправностей, источников погрешности и выхода из строя тензопреобразователя давления // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2013. № 4. С. 118–122.
9. **Пьявченко О. Н.** Особенности построения перспективных многофункциональных интеллектуальных датчиков давления // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2008. № 11. С. 110–120.
10. **Пат. 2300745 РФ.** Устройство для измерения давления / Ю. Г. Свинолулов, В. В. Бычков // *Изобретения. Полезные модели*. 2007. № 16.
11. **Тайманов Р. Е., Сапожникова К. В.** Метрологический самоконтроль датчиков // *Датчики и системы*. 2011. № 2. С. 58–66.
12. **Пронин А. Н., Сапожникова К. В., Тайманов Р. Е.** Достоверность измерительной информации в системах управления. Проблемы и решения // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2015. Т. 9. № 3. С. 32–37.
13. **Пат. 2515079 РФ.** Способ измерения давления и интеллектуальный датчик давления на его основе / В. А. Васильев, Е. М. Белозубов, П. С. Чернов // *Изобретения. Полезные модели*. 2014. № 13.
14. **Taymanov R., Sapozhnikova K., Druzhinin I.** Sensor Devices with Metrological Self-Check // *Sensors & Transducers*. 2011. V. 10. Special Issue. P. 30–45.
15. **Feng Z., Wang Q., Shida K.** Design and implementation of a self-validating pressure sensor // *IEEE Sensors Journal*. 2009. V. 5. No. 3. P. 207–218.
16. **Пат. 145163 РФ.** Датчик давления с разделительной диафрагмой с функцией метрологического самоконтроля / А. С. Семёнов, В. В. Сеницин, О. Ю. Бушуев // *Изобретения. Полезные модели*. 2014. № 25.
17. **Пат. 2515079 РФ.** Способ измерения давления и интеллектуальный датчик давления на его основе / Е. М. Белозубов, В. А. Васильев, П. С. Чернов // *Изобретения. Полезные модели*. 2014. № 13.
18. **Пат. 2498250 РФ.** МПК Способ измерения давления, калибровки и датчик давления на основе нано- и микроэлектромеханической системы / Е. М. Белозубов, В. А. Васильев, П. С. Чернов // *Изобретения. Полезные модели*. 2013. № 3.
19. **Пат. 2541714 РФ.** Высоточный датчик давления на основе нано- и микроэлектромеханической системы / В. А. Васильев, М. А. Калмыкова // *Изобретения. Полезные модели*. 2015. № 5.
20. **Пат. 2520943 РФ.** Датчик давления на основе нано- и микроэлектромеханической системы балочного типа / В. А. Васильев, А. В. Кондратьев // *Изобретения. Полезные модели*. 2014. № 12.

Дата принятия: 18.04.2018.