УДК 681.518.3

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПОСТРОЕНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДВУХКАНАЛЬНОСТИ

© 2016 В.Н. Нестеров, А.Р. Ли

АО «Самарский электромеханический завод»

Статья поступила в редакцию 16.12.2016

В статье представлены теоретические основы построения инвариантных измерительных преобразователей, базирующиеся на принципе двухканальности, предложенном академиком Б.Н. Петровым. Данный в работе метод воплощен в классе параметрических измерительных преобразователей, включающем в себя неравновесные измерительные мосты и делители напряжения. На конкретных примерах рассмотрены вопросы физической реализуемости двухканальных измерительных преобразователей, которые в данном случае рассматриваются как системы. Упомянуты области возможных применений разработанного класса преобразователей и направление дальнейших исследований.

Ключевые слова: инвариантные системы, принцип двухканальности, измерительные преобразователи, неравновесные измерительные мосты, измерительные делители напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Основные идеи создания абсолютно инвариантных относительно возмущающих воздействий систем и систем с инвариантностью до ε, а также условия их физической реализуемости первоначально были высказаны и нашли применение в теории автоматического управления и регулирования [1-4]. Вскоре были высказаны соображения о связи теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем [5]. За прошедшие годы данное направление получило дальнейшее развитие, что было обусловлено потребностями и науки, и практики [6-15]. Количество публикаций в этой области измеряется тысячами наименований, что подтверждает актуальность темы и извиняет авторов, которые не смогли упомянуть их все из-за ограничений на размер представляемого материала. Цель работы, с одной стороны, – показать, как реализуется при построении инвариантных измерительных преобразователей принцип двухканальности, сформулированный академиком Б.Н. Петровым [6], а с другой стороны, – изложить методические основы, позволяющие синтезировать класс двухканальных параметрических преобразователей, инвариантных относительно воздействия определенных возмущающих факторов. Отметим, анализ подходов, использованных в процессе построения параметрических измерительных преобразователей на основе принципа двухканальности, позволяет рассматривать их как системы, к которым применимы методы синтеза и анализа, разработанные в теории и практике информационно-измерительных систем.

Первые публикации в этой области, относящиеся к девяностым годам прошлого века [16,17], показали, что мы имеем дело с классической реализацией принципа двухканальности, но еще не оформились в понимание о возможности его распространения на весь класс параметрических измерительных преобразователей. Полученные далее порядка двадцати патентов на изобретения, на многие из которых имеются ссылки в фундаментальных работах [18, 19], позволили говорить о распространении принципа двухканальности на весь класс параметрических измерительных преобразователей. Учитывая методическую общность полученных технических решений, можно сформулировать методообразующие признаки структурного метода базирующегося на принципе двухканальности (многоканальности) [18,19].

Рассмотрим формальный аппарат синтеза структурного метода построения инвариантных преобразователей, развивающий принцип двухканальности до уровня необходимых методообразующих признаков.

1. МЕТОДООБРАЗУЮЩИЕ ПРИЗНАКИ СТРУКТУРНОГО МЕТОДА СИНТЕЗА ИНВАРИАНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДВУХКАНАЛЬНОСТИ

1.0. Наличие в структуре преобразователя 2-х (или более) каналов, «симметричных» относительно влияющих факторов ζ_j и «асимметричных» относительно информативной или информативных величин x:

Нестеров Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по науке – начальник НТЦ АО «Самарский электромеханический завод». E-mail: nesterov.ntc@gmail.com

Ли Анжелика Романовна, инженер по патентно-лицензионной работе НТЦ АО «Самарский электромеханический завод». E-mail: lika-li@mail.ru

$$\left.\begin{array}{l} Y_1 = \psi_1\{f_1(x),\zeta_j\}; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ Y_n = \psi_n\{f_n(x),\zeta_j\}, \end{array}\right\} \quad (n \geq 2) \quad , \quad (1)$$

$$f_1(x) \neq \ldots \neq f_n(x), \quad (2)$$

где $Y_1,\ldots,Y_n$ – функции преобразования измерительных каналов; $f_1(x),\ldots,f_n(x)$ – функции, обеспечивающие асимметрию поступления информативной величины x на входы соответствующих измерительных каналов.

2.0. Реализуемость в системе алгоритма, получаемого из решения относительно x системы уравнений (1), :

$$x = F(Y_1,\ldots,Y_n). \quad (3)$$

3.0. Выполнение критерия:

$$\Delta F = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{g}\frac{\partial F}{\partial Y_i}\frac{\partial Y_i}{\partial \zeta_j}\Delta\zeta_j \equiv 0 \ , \quad (4)$$

где F – результирующая функция преобразования инвариантного преобразователя; Y_i – функция преобразования i-го канала преобразования; ζ_j – j-я величина из g величин, влияющая на i-й канал преобразования; $\Delta\zeta_j$ – отклонение ζ_j от ее номинального значения.

Один из вариантов, скорее всего самый простой, реализации перечисленных методообразующих признаков в структуре измерительной системы показан на рис. 1.

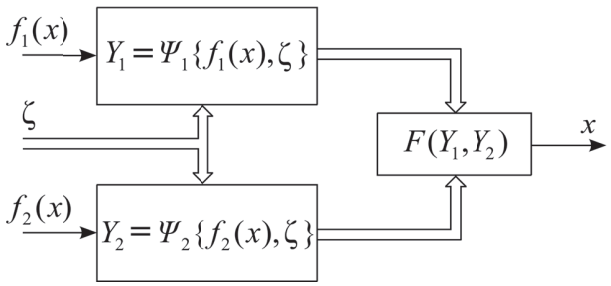

Рис. 1. Структурная схема инвариантной измерительной системы, построенной на основе принципа двухканальности

Как видно из рис. 1, в такой структуре первый методообразующий признак, заключающийся в обеспечении «симметрии» каналов восприятия и передачи информации относительно влияющих факторов ζ и «асимметрии» относительно информативной величины x, реализуется структурно. Возможны и иные структурные решения, однако, во всех случаях в рамках рассматриваемого класса преобразователей необходимым условием обеспечения инвариантности системы относительно влияющих факторов ζ является выполнение перечисленных выше методообразующих признаков. Вопросы достаточности методообразующих признаков требуют рассмотрения возможностей их физической реализуемости [18]. Учитывая, что класс параметрических измерительных преобразователей условно можно разделить на два подкласса: неравновесные измерительные мосты и измерительные делители напряжения [20], рассмотрим реализацию метода в том и другом случаях.

2. ДВУХКАНАЛЬНЫЕ НЕРАВНОВЕСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОСТЫ

2.1. Параллельно-симметричный мост с двумя рабочими плечами

Двухканальный измерительный неравновесный параллельно-симметричного мост с двумя рабочими плечами (мост Нестерова В.Н.), показанный на рис. 2, реализует способ построения инвариантной измерительной цепи [17], заключающийся в том, что включают первичные преобразователи 1 и 2 или половины дифференциального первичного преобразователя в дифференциальную и суммирующие преобразующие цепи, измеряют величины сигналов, пропорциональные полученным разности и сумме, и делят первую величину на вторую. Напряжение, пропорциональное разности токов в преобразователях 1 и 2, снимается с измерительной диагонали моста, образованного преобразователями 1…4, а напряжение, пропорциональное сумме названных токов, – с зажимов преобразователя 5, включенного последовательно с источником питания 6. Суммирование названных токов i_1 и i_2, протекающих в плечах моста, обеспечивается равенством параметров преобразователей 3, 4 и 5: $z_3 = z_4 = z_5 = z$. Тогда в соответствие с первым законом Кирхгофа на зажимах преобразователя 5 получаем: $zi = z(i_1 + i_2)$, где i – ток в диагонали питания. Дифференциальные усилители 7 и 8 построены по стандартной схеме и, обладая высоким входным сопротивлением, обеспечивают развязку каналов преобразования от схемы первичного преобразования. Устройство деления 9 может быть реализовано в аналоговом виде, однако применение цифровых технологий дает существенный выигрыш по точности вычисления.

Оба канала преобразования симметричны относительно источника питания 6 и асимметричны относительно информативных приращений параметров первичных преобразователей 1 и 2 (первый методообразующий признак структурного метода).

Напряжения на входах измерительных усилителей 7 и 8 определяются выражениями:

$$U_1 = \frac{(E - z_5 i)[(z_1 + \Delta z)z_4 - (z_2 - \Delta z)z_3]}{[(z_1 + \Delta z) + z_3][(z_2 - \Delta z) + z_4]}; \quad (5)$$

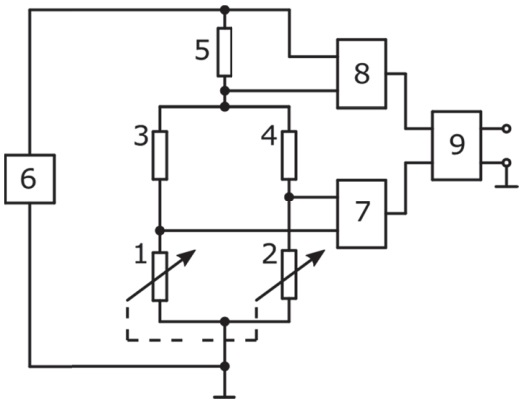

Рис. 2. Инвариантный измерительный мост Нестерова В.Н.

$$U_2 = \frac{(E - z_5 i) z_5 [(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3 + z_4]}{[(z_1 + \Delta z) + z_3][(z_2 - \Delta z) + z_4]}, \quad (6)$$

где $\frac{(E - z_5 i)}{[(z_1 + \Delta z) + z_3][(z_2 - \Delta z) + z_4]}$ – симметричная составляющая функций преобразования измерительных каналов; $[(z_1 + \Delta z) z_4 - (z_2 - \Delta z) z_3]$ и $z_5[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3 + z_4]$ – асимметричные составляющие функций преобразования измерительных каналов; E – ЭДС источника питания 6; $(z_1 + \Delta z)$ и $(z_2 - \Delta z)$ – значения параметров первичных преобразователей 1 и 2, z_1, z_2 – их начальные значения, Δz – информативные приращения; z_3, z_4, z_5 – значения параметров преобразователей 3, 4 и 5.

Сигналы $U_1^* = k_1 U_1$ и $U_2^* = k_2 U_2$ с выходов, соответственно, измерительных усилителей 7 и 8 поступают на входы устройства деления 9, на выходе которого получаем результат, реализующий второй признак (3) структурного метода:

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{k_1}{k_2} \frac{[(z_1 + \Delta z) z_4 - (z_2 - \Delta z) z_3]}{z_5[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3 + z_4]}, \quad (7)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению измерительных усилителей 7 и 8.

Выполнение условий: $k_1 = k_2$, $z_1 = z_2 = z_0$, $z_3 = z_4 = z_5 = z$, позволяет получить следующую результирующую функцию преобразования:

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{\Delta z}{(z_0 + z)}. \quad (8)$$

В соответствие с критерием (4) для функции преобразования (8) получаем реализацию третьего признака структурного метода:

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial E} \Delta E \equiv 0. \quad (9)$$

Тождественное равенство нулю критерия (9) подтверждает абсолютную инвариантность полученной структуры преобразователя относительно нестабильности ЭДС источника питания. Кроме того, как видно из (8), функция преобразования данного измерительного преобразователя линейна во всем диапазоне преобразования. Последнее объясняется тем, что нелинейная составляющая функции преобразования прототипа вошла в качестве симметричной компоненты в функции преобразования синтезированных измерительных каналов и была компенсирована.

2.2. Двухканальный неравновесный измерительный мост с одним рабочим плечом

На рис.3 представлен двухканальный неравновесный измерительный мост с одним рабочим плечом [21]. В соответствие с показанными на рис.3 обозначениями 1 – первичный преобразователь, 2, 3, 4 – преобразователи с постоянными параметрами; 5 – источник питания; 6, 7 – повторители напряжения; 8 - устройство деления.

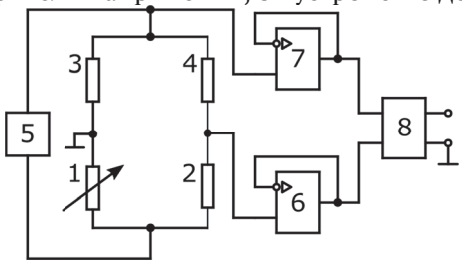

Рис. 3. Двухканальный неравновесный измерительный мост с одним рабочим плечом

Сигналы, снимаемые с выходов измерительных каналов, соответственно, с выходов повторителей напряжения 6 и 7 записываются в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} U_1^* &= k_1 U_1; \\ U_2^* &= k_2 U_2, \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению преобразователей (повторителей) напряжения 6 и 7, сигналы на входах которых определяются, соответственно, выражениями:

$$U_1 = \frac{E(z_1 z_4 - z_2 z_3 + z_4 \Delta z)}{(z_2 + z_4)[z_3 + (z_1 + \Delta z)]}; \quad (11)$$

$$U_2 = \frac{E z_3}{[z_3 + (z_1 + \Delta z)]}, \quad (12)$$

где E – ЭДС источника питания 5; z_1 – начальное значение информативного параметра первичного преобразователя 1; Δz – информативное приращение значения параметра преобразователя 1; z_2, z_3, z_4 – параметры преобразователей 2,3,4.

Соответственно, результирующая функция преобразования устройства имеет вид:

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{k_1}{k_2}\frac{(z_1 z_4 - z_2 z_3 + z_4 \Delta z)}{z_3(z_2 + z_4)}. \quad (13)$$

Она линейна во всем диапазоне изменения информативного параметра Δz и не зависит от нестабильности параметров источника питания 5, поскольку, как и в предыдущей схеме, для (13) выполняется критерий:

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial U_1^*}\frac{\partial U_1^*}{\partial E}\Delta E + \frac{\partial F}{\partial U_2^*}\frac{\partial U_2^*}{\partial E}\Delta E \equiv 0.$$

При выполнении условий $k_1 = k_2$ и $z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z$ функция преобразования (13) еще более упрощается:

$$F = \frac{\Delta z}{2z}. \quad (14)$$

2.3. Двухканальный мост с принудительной балансировкой

В основе схемы, представленной на рис. 4, использован мост с принудительной балансировкой [22]. Он содержит четыре резистивных преобразователя 1–4, один из которых первичный, включенный между инвертирующим входом и выходом операционного усилителя 5, подключенного своими входами в диагональ моста между преобразователями 1 и 2, 3 и 4, соответственно. Дополнительно в схему введены два повторителя напряжения 7 и 8, подключенные, соответственно, к выходу операционного усилителя 5 и к точке между преобразователями 1 и 3 диагонали источника питания 6, а выходы повторителей напряжения 7 и 8 подключены ко входам устройства деления 9 [23].

Напряжения на выходах повторителей напряжения 7 и 8 определяются, соответственно, выражениями:

$$U_1 = k_1 E\left\{\frac{r_4}{(r_3 + r_4)}\left[1 + \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1}\right] - \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1}\right\}; \quad (15)$$

$$U_1 = k_2 E\ , \quad (16)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению повторителей напряжения 7 и 8; E – ЭДС источника питания 6; r_1, r_3, r_4 – номинальные значения сопротивлений резисторов 1, 3, 4; r_2 – начальное значение сопротивления резистивного преобразователя 2; Δr – информативное приращение сопротивления r_2.

В соответствии с алгоритмом работы на выходе устройства деления 9 получаем:

$$F = \frac{U_1}{U_2} = \frac{k_1}{k_2}\left\{\frac{r_4}{(r_3 + r_4)}\left[1 + \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1}\right] - \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1}\right\}. \quad (17)$$

При выполнении условий $k_1 = k_2$ и $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r$ функция преобразования (17) принимает следующий вид:

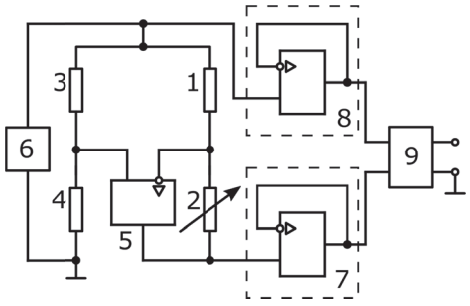

Рис. 4. Двухканальный измерительный мост с принудительной балансировкой

$$F = -\frac{\Delta r}{2r}. \quad (18)$$

Она также линейна во всем диапазоне изменения информативного параметра Δr и не зависит от нестабильности параметров источника питания 6. Последнее подтверждается выполнением критерия (4) для функции преобразования (17) :

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial U_1}\frac{\partial U_1}{\partial E}\Delta E + \frac{\partial F}{\partial U_2}\frac{\partial U_2}{\partial E}\Delta E \equiv 0.$$

Знак минус говорит о направлении изменения информативного параметра.

2.4. Двухканальный неравновесный измерительный мост с четырьмя рабочими плечами

Рассмотрим схему двухканального неравновесного измерительного моста с четырьмя рабочими плечами, изображенную на рис. 5. В отличие от схемы на рис.3 все преобразователи 1–4 в плечах моста первичные и включены, соответственно, дифференциально. Остальные элементы схемы: 5 – источник питания, 6 – повторитель напряжения, 7 – дифференциальный усилитель, 8 – устройство деления. Такое включение первичных преобразователей может быть использовано в устройствах для измерения крутящего момента на вращающихся валах [24]. В этом случае в качестве первичных преобразователей используются тензорезисторы соответствующим образом закрепляемые на вращающемся валу, испытывающем деформации кручения.

Выражения, описывающие сигналы, поступающие на входы устройства деления 8, имеют вид:

$$U_1 = \frac{k_1 E\left[z_1 z_4 - z_2 z_3 + (z_1 + z_2 + z_3 + z_4)\Delta z\right]}{(z_1 + z_3)(z_2 + z_4)}; \quad (19)$$

$$U_2 = k_2 E\ , \quad (20)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению блоков 6 и 7; E – ЭДС источника питания 5; z_1, z_2, z_3, z_4 – начальные значения информативных параметров дифференциально включенных первичных преобразователей 1–4; Δz – изменение с соответствующим знаком параметров z_1, z_2, z_3, z_4.

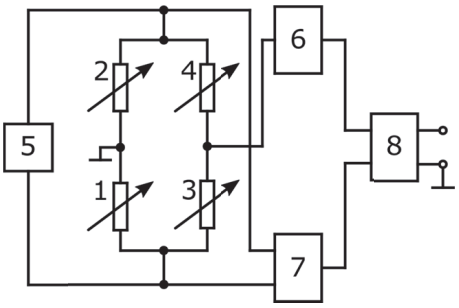

Рис. 5. Двухканальный неравновесный измерительный мост с четырьмя рабочими плечами

В соответствии с реализуемым алгоритмом функция преобразования такого моста имеет вид:

$$F = \frac{U_1}{U_2} = \frac{k_1}{k_2}\frac{z_1 z_4 - z_2 z_3 + (z_z + z_2 + z_3 + z_4)\Delta z}{(z_1 + z_3)(z_2 + z_4)}. \quad (21)$$

При $k_1 = k_2$, $z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z$ выражение (21) упрощается:

$$F = \frac{\Delta z}{z}. \quad (22)$$

Таким образом, как видно из (22), полученная функция преобразования в соответствие с критерием (4) абсолютно инвариантна относительно нестабильности параметров источника питания 5 и показывает вдвое большую чувствительность относительно предшествующего варианта.

Ограничившись примерами измерительных мостов, построенных на основе принципа двухканальности, выскажем предположение о возможности иных реализаций на основе метода, представленного в первой части работы.

Следующая часть посвящена двухканальным измерительным делителям напряжения, построенным на той же методической основе и, соответственно, обеспечивающих инвариантность относительно нестабильности соответствующих влияющих факторов.

3. ДВУХКАНАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Измерительные делители напряжения, относящиеся к классу параметрических измерительных преобразователей, обладая существенной простотой, не свободны от недостатков, свойственных неравновесным измерительным мостам. Следует отметить также наличие у них на выходе постоянной неинформативной составляющей при нулевом входном сигнале. Представленный далее класс двухканальных измерительных делителей напряжения, построенных на общей методической основе, устраняет недостатки классических технических решений [20].

3.1. Двухканальный измерительный делитель напряжения с одним рабочим плечом

Измерительный делитель напряжения, показанный на рис.6, содержит два преобразователя напряжения 1 и 2, один из которых первичный, источник питания 3, повторители напряжения 4 и 5 на операционных усилителях с высоким входным сопротивлением, которые использованы для гальванической развязки входных и выходных цепей, и устройство деления 6. Оригинальность устройства заключается в использовании общей точки, подключенной к смежным преобразователям 1 и 2, что в сочетании с реализацией логометрического принципа позволяет линеаризовать его функцию преобразователя [25].

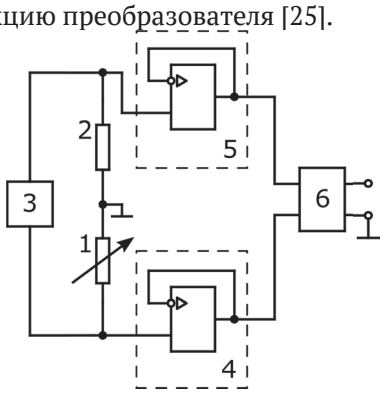

Рис. 6. Двухканальный измерительный делитель напряжения с одним рабочим плечом

Напряжения на выходах повторителей напряжения 4, 5 (могут быть использованы масштабные усилители с высоким входным сопротивлением) описываются выражениями:

$$U_1 = \frac{k_1 E (z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z) + z_2}; \quad (23)$$

$$U_2 = -\frac{k_2 E z_2}{(z_1 + \Delta z) + z_2}, \quad (24)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению повторителей напряжения 4 и 5; E – ЭДС источника питания 3; z_1 – начальное значение информативного параметра преобразователя 1; Δz – информативное изменение параметра z_1; z_2 – значение параметра преобразователя 2.

Сигналы (23) и (24) поступают на соответствующие входы устройства деления 6, на выходе которого получаем:

$$F = -\frac{U_1}{U_2} = -\frac{k_1}{k_2}\frac{(z_1 + \Delta z)}{z_2}. \quad (25)$$

При $k_1 = k_2$, $z_1 = z_2 = z$ функция преобразования (25) устройства упрощается и приобретает вид:

$$F = -(1 + \Delta z / z). \quad (26)$$

Выражение (26) показывает, что функция преобразования устройства, в отличие от прототипа, линейна во всём диапазоне изменения информативного параметра Δz и не зависит от нестабильности источника питания. Последнее также подтверждается критерием (4) для функции преобразования (25) :

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial U_1}\frac{\partial U_1}{\partial E}\Delta E + \frac{\partial F}{\partial U_2}\frac{\partial U_2}{\partial E}\Delta E \equiv 0.$$

Однако, в отличие от измерительных мостов, сигнал на выходе содержит аддитивную неинформативную составляющую.

3.2. Двухканальный измерительный делитель напряжения с дополнительным сумматором в цепи одного из каналов

На рис. 7 представлена схема двухканального измерительного делителя напряжения, которая в отличие от предыдущей схемы кроме преобразователей напряжения 1 и 2, один из которых первичный, источника питания 3, повторителей напряжения 4 и 5 и устройства деления 7 содержит инвертирующий сумматор 6 [26].

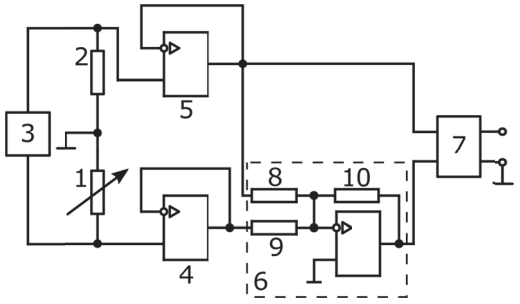

Рис. 7. Двухканальный делитель напряжения с дополнительным сумматором в цепи одного из каналов

Для этой схемы напряжения на выходах инвертирующего сумматора 6 и повторителя напряжения 5, поступающие на входы устройства деления 7, описываются выражениями:

$$U_1 = \frac{E\, r_3 \left[k_1 r_1 (z_1 + \Delta z) - k_2 r_2 z_2\right]}{r_1 r_2 \left[(z_1 + \Delta z) + z_2\right]}; \quad (27)$$

$$U_2 = \frac{E\, k_2 z_2}{\left[(z_1 + \Delta z) + z_2\right]}, \quad (28)$$

где E – ЭДС источника питания 3; z_1 – начальное значение параметра первичного преобразователя 1; z_2 – значение параметра преобразователя 2; Δz – информативное изменение параметра z_1; k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению повторителей (или масштабных усилителей) напряжения 4 и 5; r_1, r_2, r_3 – значения сопротивлений резисторов 8,9,10.

Соответственно, на выходе устройства деления 7 получаем:

$$F = \frac{U_1}{U_2} = \frac{r_3 \left[k_1 r_1 (z_1 + \Delta z) - k_2 r_2 z_2\right]}{k_2 r_1 r_2 z_2}. \quad (29)$$

При $k_1 = k_2$, $r_1 = r_2$, $z_1 = z_2 = z$ функция преобразования устройства (29) упрощается и приобретает вид:

$$F = \frac{r_3}{r_1}\frac{\Delta z}{z}. \quad (30)$$

Как видно из (30), данная схема, сохраняя все положительные качества предшествующей, показанной на рис. 6, не создает постоянной неинформативной составляющей на выходе, что дает ей определенные преимущества.

3.3. Двухканальный измерительный делитель напряжения с дифференциальным первичным преобразователем

На рис. 8 показана схема двухканального делителя напряжения с дифференциальным первичным преобразователем 1, включенным в цепь с источником питающего напряжения 2. Для обеспечения двух измерительных каналов использованы повторители напряжения 3 и 4 (могут быть использованы масштабные усилители с высоким входным сопротивлением) и устройство деления 5.

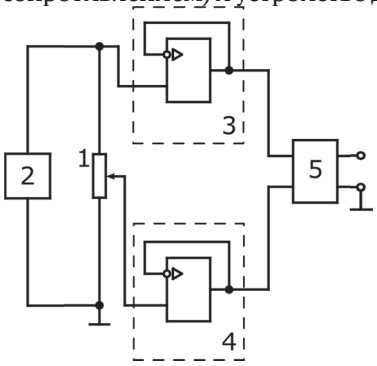

Рис. 8. Двухканальный измерительный делитель напряжения с дифференциальным первичным преобразователем

В этом случае напряжения на выходах повторителей напряжения 4 и 3 описываются, соответственно, выражениями:

$$U_1 = \frac{k_1 E (z_1 + \Delta z)}{z}; \quad (31)$$

$$U_2 = k_2 E, \quad (32)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению повторителей (или масштабных усилителей) напряжения 4 и 3; E – ЭДС источника питания 2; $z = z_1 + z_2$ – сумма начальных значений параметров плеч дифференциального первичного преобразователя 1; Δz – информативное изменение с соответствующим знаком параметров z_1 и z_2.

Сигналы (31) и (32) с выходов повторителей напряжения 4 и 3 поступают на соответствующие входы устройства деления 5, на выходе которого получаем:

$$F = \frac{U_1}{U_2} = \frac{k_1}{k_2}\frac{(z_1 + \Delta z)}{z}. \qquad (33)$$

Функция преобразования (33), как и в предыдущих схемах, абсолютно инвариантна относительно нестабильности параметров источника питания 2, но содержит аддитивную неинформативную составляющую $k_1 z_1 / k_2 z$.

3.4. Двухканальный измерительный делитель напряжения с перекрестными обратными связями

Измерительный преобразователь [27], представленный на рис.9, реализует способ построения инвариантной измерительной цепи, предложенный патентом РФ [17], и содержит дифференциальный первичный измерительный преобразователь 1, источник питания 2, преобразователи (в данном случае повторители) напряжения 3 и 4 с высоким входным сопротивлением, инвертирующий сумматор 5, дифференциальный усилитель 6 и устройство деления 7.

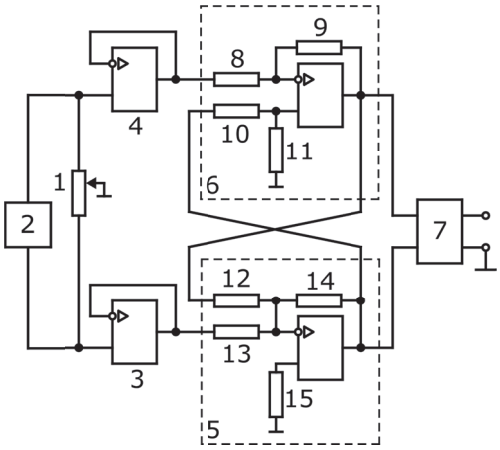

Рис. 9. Двухканальный делитель напряжения с перекрестными обратными связями

Напряжения на выходах повторителей напряжения 3 и 4 записываются в виде:

$$U_1 = -k_1 E \frac{(z - \Delta z)}{2z}; \qquad (34)$$

$$U_2 = k_2 E \frac{(z + \Delta z)}{2z}, \qquad (35)$$

где E – ЭДС источника питания 2; k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению повторителей 3 и 4 (в данном случае $k_1 = k_2 = 1$); z – начальные значения параметров плеч дифференциального преобразователя 1; Δz – информативное отклонение с соответствующим знаком параметров плеч дифференциального первичного преобразователя 1 от начальных значений $z_1 = z_2 = z/2$; коэффициенты передачи по напряжению сумматора 5 и дифференциального усилителя 6 приняты равными 1 (т.е. $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = r_7$,где $r_1 ... r_7$ – сопротивления резисторов 8…14).

Соответственно, после прохождения сигналов через инвертирующий сумматор 5 и дифференциальный усилитель 6 на выходе устройства деления 7 получаем:

$$F = \frac{(U_2 + U_1)}{(U_2 - U_1)} = \frac{\Delta z}{z}. \qquad (36)$$

Как видно из выражения (36), функция преобразователя данного устройства абсолютно инвариантна относительно нестабильности параметров источника питания 2, что подтверждается выполнением критерия (4):

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial U_1}\frac{\partial U_1}{\partial E}\Delta E + \frac{\partial F}{\partial U_2}\frac{\partial U_2}{\partial E}\Delta E \equiv 0$$

Кроме того, на выходе отсутствует неинформативная составляющая при нулевом входном сигнале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из рассмотренных представителей класса двухканальных измерительных преобразователей, а также из ряда других работ [11, 12, 28-31], принцип двухканальности, реализованный в структурах измерительных устройств, эффективен и позволяет на единой методической основе решать задачи создания новых измерительных преобразователей и систем, обладающих существенными преимуществами относительно прототипов. Особенностью рассмотренного метода является возможность компенсации нестабильности параметров элементов измерительных устройств, влияющих на оба измерительных канала. В теоретической части работы эта особенность формулируется как «симметричность» измерительных каналов относительно влияющих факторов. При этом, если удается организовать присутствие нелинейной компоненты «симметрично» в функциях преобразования обоих измерительных каналов, как в примерах, показанных на рисунках 2, 3, 6, 7, то нелинейная компонента также компенсируется, что является дополнительным преимуществом класса.

Однако в общем случае для любых измерительных структур, которые в данном случае рассматриваются как системы, и любых влияющих факторов сформулированные выше методические признаки не всегда поддаются физической реализации. Это объясняется тем,

что источниками погрешностей измерительных систем являются нестабильность и технологический разброс параметров всех входящих в них элементов, обеспечить «симметрию» влияния которых на разные измерительные каналы не всегда возможно. Поэтому направление дальнейших исследований целесообразно связать с необходимостью компенсации нестабильности элементов измерительных преобразователей и систем, когда предложенный метод теряет свою эффективность.

Сферами возможного использования предложенных технических решений являются космические исследования с помощью автономных аппаратов, обеспечение безопасности ядерных энергетических установок, а также измерения в машиностроении, химической промышленности, океанологии и других областях специального назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кульбакин В.С.* О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах // ДАН СССР. 1948. Т.60. №2. С.231-234.
2. *Петров Б.Н.* Принцип инвариантности и условия его применения при расчёте линейных и нелинейных систем // Теория непрерывных систем: Труды 1 междунар. конгр. ИФАК. Т.1. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С.259-275.
3. *Петров Б.Н., Кухтенко А.И.* Структуры абсолютно инвариантных систем и условия их физической реализуемости / В кн.: Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Всесоюз. совещания. М.: Наука, 1964. С.24-28.
4. *Хрусталев М.М.* Необходимые и достаточные условия слабой инвариантности // Автоматика и телемеханика. 1968. №4. С.17-22.
5. *Ивахненко А.Г.* Связь теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем // Автоматика. 1960. №5. С.35-40.
6. *Петров Б.Н., Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.* Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: Наука, 1976. 244 с.
7. *Чехонадский Н.А.* Использование явления компенсации погрешностей для повышения точности измерительных информационных систем // Измерительная техника. 1963. №1. С.3-6.
8. *Земельман М.А.* Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М. Издательство стандартов, 1972. 199 с.
9. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / *Мартяшин А.И., Куликовский К.Л., Куроедов С.К., Орлова Л.В.*[под ред. А.И. Мартяшина]. М.: Машиностроение, 1990. – 216 с.
10. *Шакурский В.К.* Синтез инвариантных преобразователей методом контрольного значения // Автоматика и телемеханика. 1998. №3 С.42–49.
11. *Нестеров В.Н.* Инвариантные параметрические измерительные преобразователи с линейными функциями преобразования // Измерительная техника. 1993. №3. С.52-55.
12. *Нестеров В.Н.* Двухканальные параметрические измерительные преобразователи с линейными функциями преобразования // Измерительная техника. 1999. №5. С.39-45.
13. *Чернецов В.И.* Развитие теории и совершенствование унифицирующих измерительных преобразователей для параметрических датчиков: Автореф. дис. … докт. техн. наук. Пенза: ПГУ, 2000.
14. *Свистунов Б.Л.* Структурно-алгоритмические методы синтеза средств инвариантного измерения параметров электрических цепей: Автореф. дис. … докт. техн. наук. Пенза: ПГУ, 2004.
15. *Кузнецов Е.Н.* Структурные методы повышения точности измерения параметров электрических цепей: Автореф. дис. … докт. техн. наук. Пенза: ПГУ, 2007.
16. *Нестеров В.Н.* Устройство для измерения перемещений В.Н. Нестерова: А.с. 1444618 (СССР). 1988.
17. *Нестеров В.Н.* Способ построения инвариантной измерительной цепи и инвариантный измерительный мост Нестерова В.Н.: Пат.1795375 (РФ). 1993.
18. *Нестеров В.Н.* Структурно-технологический метод синтеза инвариантных измерительных преобразователей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. Том 9, № 3. С.96-104.
19. *Нестеров В.Н.* Структурный и технологический методы в задачах построения инвариантных измерительных преобразователей // Измерительная техника. 2007. № 2. С.8-12.
20. Электрические измерения неэлектрических величин / *А.М. Туричин, П.В. Новицкий, Е.С. Левшина* и др.; [под ред. П. В. Новицкого]. Л.: Энергия, 1975. 576 с.
21. *Нестеров В.Н.* Инвариантный измерительный мост: Пат.2071064 (РФ).1996.
22. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ. / Под ред. *У.Томпкинса, Дж.Уэбстера*. М.: Мир,1992. 592 с.
23. *Нестеров В.Н.* Инвариантный измерительный мост: Пат.2072730 (РФ). 1997.
24. *Нестеров В.Н.* Измеритель крутящего момента: Пат.2068550 (РФ). 1996.
25. *Нестеров В.Н.* Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя: Пат.2121148 (РФ). 1998.
26. *Нестеров В.Н.* Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя напряжения: Пат.2118826 (РФ). 1998.
27. *Нестеров В.Н.* Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя напряжения: Пат.2117951 (РФ). 1998.
28. *Нестеров В.Н.* Инвариантные делители напряжения для измерительных приборов // Приборы и системы управления. 1995. №12. С.30-31.
29. *Нестеров В.Н.* Системный подход в проектировании тензорезисторных измерителей крутящего момента: синтез и анализ // Измерительная техника. 2001. №8. С.41-45.
30. *Нестеров В.Н., Ли А.Р.* Анализ условий инвариантности шестиплечего измерительного моста // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 9. 2014. №10 (137). С. 64-68.
31. *Нестеров В.Н., Ли А.Р.* Принцип двухканальности в реализации инвариантных измерительных преобразователей и систем // Методы, средства и

технологии получения и обработки измерительной информации: Материалы Междунар. научно-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016». Пенза: ПГУ, 2016. С. 34-38.

THE THEORY AND PRACTICE OF DESIGNING OF INVARIANT MEASUREMENT TRANSDUCERS AND SYSTEMS BASED ON THE TWO-CHANNEL PRINCIPLE

© 2016 V.N. Nesterov, A.R. Li

JSC “Samara Electromechanical Plant”

The article presents the theoretical foundations designing of invariant measurement transducers based on the principle of two-channel, which was proposed by Academician B.N. Petrov. This method is implemented in the class of parametric measurement transducers, including the measurement bridges and voltage dividers. Questions of physical realizability of two-channel measuring transducers were considered. Measuring transducers in this case considered as the systems. Areas of possible applications of developed class of measurement transducers and the direction of future research were indicated.
Keywords: invariant systems, two-channel principle, measurement transducers, non-equilibrium measurement bridges, measurement voltage dividers.

Vladimir Nesterov, Doctor of Technics, Professor, Deputy Director General for Science - Head of Technical Research Centre of JSC "Samara Electromechanical Plant".
E-mail: nesterov.ntc@gmail.com
Anzhelika Lee, Engineer by Patent and Licensing Work of Technical Research Centre of JSC "Samara Electromechanical Plant". E-mail: lika-li@mail.ru