

УДК 681.518.3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ КВАЗИИНВАРИАНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДВУХКАНАЛЬНОСТИ

© 2017 В.Н. Нестеров, А.Р. Ли

АО «Самарский электромеханический завод»

Статья поступила в редакцию 08.11.2017

В статье представлены теоретические основы построения квазиинвариантных измерительных преобразователей, базирующиеся на принципе двухканальности, предложенном академиком Б.Н. Петровым. Рассмотренный в работе метод получил название технологический. Он используется в случаях, когда условия абсолютной инвариантности измерительных преобразователей и систем не могут быть реализованы. Параллельно с методом дается методика выявления условий квазиинвариантности, по существу представляющих собой «ноу-хау» в каждом конкретном случае. Метод и методика иллюстрированы примерами в классе двухканальных мостовых и полумостовых измерительных преобразователей.

Ключевые слова: квазиинвариантные системы, принцип двухканальности, технологический метод, измерительные преобразователи, неравновесные измерительные мосты, измерительные делители напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы теории и практики построения инвариантных измерительных преобразователей и систем, предназначенных для работы в жестких эксплуатационных условиях, изложены в цикле работ, достаточно полно охватывающих данную предметную область [1-9]. Однако, как показывает анализ, возможности физической реализуемости методообразующих признаков [1], обеспечивающих абсолютную инвариантность двухканальных измерительных преобразователей относительно действия влияющих факторов на все элементы устройств ограничены конструктивными или экономическими причинами. При этом источниками погрешностей измерительных устройств являются нестабильность и технологический разброс параметров всех входящих в них элементов. Оценивая серьезность и глобальность проблемы, понимая невозможность существования универсальных рецептов, в работе поставлена цель – сформировать методические основы технических и технологических решений построения квазиинвариантных измерительных преобразователей и систем, широко применимых в теории и практике измерений. Прежде чем перейти к

сущности предлагаемых решений отметим, что принцип двухканальности, сформулированный академиком Б.Н. Петровым [10,11] и нашедший применение также и в измерительной технике, далеко себя не исчерпал и может служить базой для дальнейших изысканий в сфере разработки инвариантных и квазиинвариантных систем и преобразователей. Ценность его состоит в том, что лежащая в основе идея о необходимости «симметричной» по двум каналам передачи в систему возмущающих воздействий для компенсации их влияния на результат дает простор для дальнейшего творчества. По существу, условие двухканальности является необходимым, но не достаточным для построения инвариантной системы. Единство же необходимых и достаточных условий отражается в методических признаках, которые будучи сформулированы и реализованы в соответствующих структурах, дают нам новый метод и построенный на его основе класс измерительных устройств. Это отражено в классе двухканальных измерительных преобразователей, обеспечивающих абсолютную инвариантность относительно возмущающих воздействий, приводящих к погрешностям измерений [12]. Такой же подход будет выдержан в дальнейшем изложении материала. Отметим также, что термин «квазиинвариантность», вынесенный в название, ранее касался работ авторов в области систем автоматического управления и регулирования с инвариантностью до \mathcal{E} , когда условия абсолютной инвариантности по каким-либо причинам выполнить было невозможно [13-15]. Учитывая, что любое средство

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

измерения обладает разного вида погрешностями, то термин «квазиинвариантность» в данном случае отражает наличие методических погрешностей, имеющих место в силу невозможности абсолютной компенсации действия возмущающих факторов на все элементы измерительных устройств. Если взять за основу механизм реализации предлагаемого метода, то наиболее удачным, отражающим сущность выполняемых мероприятий, является термин – технологический.

По аналогии с работой на родственную тему [1], рассмотрим формальный аппарат синтеза технологического метода построения квазиинвариантных измерительных преобразователей, развивающий принцип двухканальности до уровня необходимых методобразующих признаков.

1. МЕТОДОБРАЗУЮЩИЕ ПРИЗНАКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА СИНТЕЗА КВАЗИИНВАРИАНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДВУХКАНАЛЬНОСТИ

1. Наличие в структуре системы q элементов ($q \geq 2$), подверженных влиянию со стороны влияющих факторов ζ_j .

2. Реализуемость специальных технологических мероприятий, приводящих к «дифференциально-симметричному» воздействию влияющих факторов на параметры входящих в систему элементов:

$$\left\{ \frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} - \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}} \right\} \rightarrow 0, \quad r \neq l; \quad r, l \in q, \quad (1)$$

где $\Delta k_{ir}(\zeta_j), \Delta k_{il}(\zeta_j)$ – отклонения k -го параметра, соответственно, r -го и l -го элементов i -го канала преобразования от номинальных значений k_{ir0}, k_{il0} под действием влияющих факторов ζ_j .

3. Выполнение критерия:

$$\Delta F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q \frac{\partial F}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial k_{ij}(\zeta_j)} \Delta k_{ij}(\zeta_j) \rightarrow 0, \quad (2)$$

где F – результирующая функция преобразования системы; Y_i – функция преобразования i -го канала преобразования; n – количество каналов.

В предельном случае, если выражения вида (1) превратятся в тождество, критерий (2) достигает нулевого экстремума, и можно говорить об абсолютной инвариантности системы относительно возмущающих воздействий, реализующейся за счет соответствующих мероприятий. Однако такой случай является идеальным. Поэтому принципиально важной задачей в каждом конкретном случае является методическая за-

дача поиска пар элементов и соответствующих им технологических мероприятий, приводящих к максимально близкому выполнению критерия (2). По существу речь идет о выявлении некоего технологического «ноу-хау», связанного со знанием: какие пары (группы) элементы использовать в каждом случае, как их расположить в пространстве, как подключать источники питания и т.д. Соответственно, решаемая задача может быть разделена на две. Первая из них заключается в воплощении признаков, отражающих принципиальную сущность технологического метода, вторая – в реализации методики, позволяющей эти признаки эффективно применить на практике.

Методика выявления технологического «ноу-хау» базируется на использовании критерия (2). Поскольку левая часть последнего представляет собой выражение погрешности, возникающей вследствие действия влияющих факторов на входящие в систему элементы, то, приравняв ее нулю и осуществив необходимые преобразования, представляется возможным в аналитическом виде:

$$\frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} = \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}}, \quad r \neq l; \quad r, l \in q \quad (3)$$

найти условия минимизации названной погрешности. Последние и определяют технологическое «ноу-хау», физическая сущность и реализуемость которого в каждом конкретном случае зависят от физики влияющих факторов и конструктивно-технологического исполнения устройства и его элементов. В частности принципиальным вопросом является выявление в устройстве одной или более групп технологически сходных элементов, где количество элементов в группе отвечает требованию $q \geq 2$.

Рассмотрим работу метода и методику его реализации на представителях класса двухканальных измерительных преобразователей в составе неравновесных измерительных мостов и делителей напряжения.

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.1, реализует способ построения инвариантной измерительной цепи [16]. Он содержит первичные преобразователи 1 и 2 или половины дифференциального первичного преобразователя, включенные в дифференциальную и суммирующую преобразующие цепи,

преобразователи (в данном случае резисторы) 3...5, источник питания 6, дифференциальные усилители 7 и 8, устройство деления 9.

Оба канала преобразования симметричны относительно источника питания 6 и асимметричны относительно информативных приращений параметров первичных преобразователей 1 и 2.

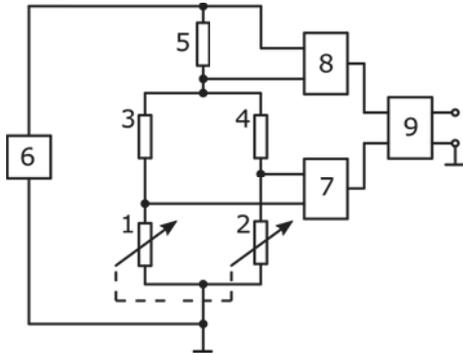


Рис. 1. Инвариантный измерительный мост Нестерова В.Н.

Напряжения на входах измерительных усилителей 7 и 8 определяются выражениями:

$$U_1 = \frac{(E - z_5 i)[(z_1 + \Delta z)z_4 - (z_2 - \Delta z)z_3]}{[(z_1 + \Delta z) + z_3][(z_2 - \Delta z) + z_4]}; \quad (4)$$

$$U_2 = \frac{(E - z_5 i)z_5[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3 + z_4]}{[(z_1 + \Delta z) + z_3][(z_2 - \Delta z) + z_4]}, \quad (5)$$

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:

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{k_1}{k_2} \frac{[(z_1 + \Delta z)z_4 - (z_2 - \Delta z)z_3]}{z_5[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3 + z_4]}, \quad (6)$$

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 по-

лучить следующую результирующую функцию преобразования:

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{\Delta z}{(z_0 + z)}. \quad (7)$$

В данном устройстве, представляющем по существу двухканальную систему, на основе принципа двухканальности реализован структурный метод [1], обеспечивающий абсолютную инвариантность относительно нестабильности параметров источника питания моста, что подтверждается тождественным выполнением критерия:

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial E} \Delta E \equiv 0. \quad (8)$$

Однако, несмотря на достигнутые результаты в каналах измерительного моста, показанного на рис. 1, имеются элементы, нестабильность которых в условиях воздействия внешних и внутренних факторов может стать источником возникновения дополнительных погрешностей. Выражение погрешности от действия влияющих факторов на другие элементы устройства может быть получено в соответствии с критерием (2):

$$\begin{aligned} \Delta F = & \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial(z_1 + \Delta z)_0} \Delta(z_1 + \Delta z) + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial(z_1 + \Delta z)_0} \Delta(z_1 + \Delta z) + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial(z_2 - \Delta z)_0} \Delta(z_2 - \Delta z) + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial(z_2 - \Delta z)_0} \Delta(z_2 - \Delta z) + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial z_{30}} \Delta z_3 + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial z_{30}} \Delta z_3 + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial z_{40}} \Delta z_4 + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial z_{40}} \Delta z_4 + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial z_{50}} \Delta z_5 + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial z_{50}} \Delta z_5 + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial k_{10}} \Delta k_1 + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial k_{10}} \Delta k_1 + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial k_{20}} \Delta k_2 + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial k_{20}} \Delta k_2, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta(z_1 + \Delta z), \Delta(z_2 - \Delta z), \Delta z_3, \Delta z_4, \Delta z_5$ – отклонения параметров элементов схемы 1...5 от их номинальных значений $(z_1 + \Delta z)_0, (z_2 - \Delta z)_0, z_{30}, z_{40}, z_{50}$ в результате воздействия дестабилизирующих факторов; $\Delta k_1, \Delta k_2$ – отклонения от номинальных значений k_{10} и k_{20} коэффициентов усиления по напряжению дифференциальных усилителей 7 и 8.

Подставляя, получаем:

$$\begin{aligned} \Delta F = & \frac{k_{10}/k_{20}}{z_{50}[(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30} + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}]} \times \\ & \times \left\{ \frac{z_{30}(z_1 + \Delta z)_0[(z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}]}{(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}} \right\} \times \\ & \times \left[\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta z_3}{z_{30}} \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{z_{40}(z_2 - \Delta z)_0 [(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}] \left[\frac{\Delta z_4}{z_{40}} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right] +}{(z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}} + \\
 & + \frac{(z_1 + \Delta z)_0 z_{40} - (z_2 - \Delta z)_0 z_{30}}{(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30} + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}} \times \\
 & \times \left\{ [(z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}] \left[\frac{\Delta(z_1 + \Delta z) + \Delta z_3}{(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}} - \frac{\Delta z_5}{z_{50}} \right] + \right. \\
 & + [(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}] \left[\frac{\Delta(z_2 - \Delta z) + \Delta z_4}{(z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}} - \frac{\Delta z_5}{z_{50}} \right] \left. \right\} + \\
 & + [(z_1 + \Delta z)_0 z_{40} - (z_2 - \Delta z)_0 z_{30}] \left\{ \frac{\Delta k_1}{k_{10}} - \frac{\Delta k_2}{k_{20}} \right\}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Рассмотрение выражения (10) позволяет нам выявить четыре группы элементов, отвечающих первому методообразующему признаку. В соответствии с критерием (2), устремляя выражение (10) к нулю, выявляем условия, выполнение которых приведет к минимизации выражения погрешности за счет компенсации воздействия влияющих факторов на данные группы элементов:

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta z_3}{z_{30}} \right\} \rightarrow 0; \\
 & \left\{ \frac{\Delta z_4}{z_{40}} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right\} \rightarrow 0; \\
 & \left\{ \frac{\Delta(z_1 + \Delta z) + \Delta z_3}{(z_1 + \Delta z)_0 + \Delta z_3} - \frac{\Delta z_5}{z_{50}} \right\} \rightarrow 0; \\
 & \left\{ \frac{\Delta(z_2 - \Delta z) + \Delta z_3}{(z_2 - \Delta z)_0 + \Delta z_3} - \frac{\Delta z_5}{z_{50}} \right\} \rightarrow 0; \\
 & \left\{ \frac{\Delta k_1}{k_{10}} - \frac{\Delta k_2}{k_{20}} \right\} \rightarrow 0.
 \end{aligned} \tag{11}$$

По существу из (11) следует необходимость обеспечения «дифференциально-симметричного» влияния дестабилизирующих факторов на параметры соответствующих групп элементов. В аналитическом виде это записывается группой выражений:

$$\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} = \frac{\Delta z_3}{z_{30}}; \quad \frac{\Delta z_4}{z_{40}} = \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0}; \tag{12}$$

$$\frac{\Delta(z_1 + \Delta z) + \Delta z_3}{(z_1 + \Delta z)_0 + \Delta z_3} = \frac{\Delta z_5}{z_{50}} = \frac{\Delta(z_2 - \Delta z) + \Delta z_4}{(z_2 - \Delta z)_0 + \Delta z_4},$$

$$\frac{\Delta k_1}{k_{10}} = \frac{\Delta k_2}{k_{20}}. \tag{13}$$

Анализ условий (12) и (13) позволяет определить конструктивные и технологические требования, касающиеся соответствующих групп

элементов рассмотренного неравновесного измерительного моста, выполнение которых позволит обеспечить компенсацию действующих на них влияющих факторов. Эти требования касаются и пассивных элементов (12) и активных (13). К последним относятся дифференциальные усилители 7 и 8. Вопросы физической реализуемости условий (12) и (13), а также аналогичных условий для преобразователей, представленных далее, даны в заключении, поскольку в рамках предложенного метода они носят универсальный характер.

2.2. Двухканальный неравновесный измерительный мост с одним рабочим плечом

На рис.2 представлен двухканальный неравновесный измерительный мост с одним рабочим плечом [17], где 1 – первичный преобразователь; 2, 3, 4 – преобразователи с постоянными параметрами; 5 – источник питания; 6, 7 – повторители напряжения; 8 – устройство деления.

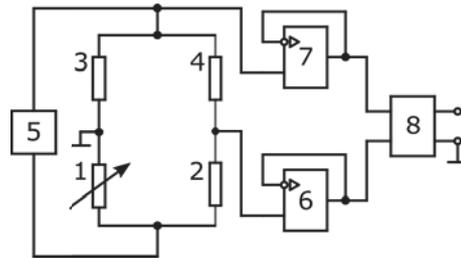


Рис. 2. Двухканальный неравновесный измерительный мост с одним рабочим плечом

Сигналы, снимаемые с выходов измерительных каналов, соответственно, с выходов повторителей напряжения 6 и 7:

$$\begin{cases} U_1^* = k_1 U_1; \\ U_2^* = k_2 U_2, \end{cases} \tag{14}$$

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

$$U_1 = \frac{E(z_1 z_4 - z_2 z_3 + z_4 \Delta z)}{(z_2 + z_4)[z_3 + (z_1 + \Delta z)]}; \tag{15}$$

$$U_2 = \frac{E z_3}{[z_3 + (z_1 + \Delta z)]}, \tag{16}$$

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:

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{k_1}{k_2} \frac{(z_1 z_4 - z_2 z_3 + z_4 \Delta z)}{z_3(z_2 + z_4)}. \quad (17)$$

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 (17) 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 (17) упрощается:

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

Однако, как и в предыдущем случае, в схеме присутствуют элементы, нестабильность которых является источником дополнительной погрешности и потому требует дополнительной компенсации. Рассмотрев схему, данную на рис. 2, также видим в ее составе группы однотипных элементов. Реализуя методику, опробованную в рамках технологического метода, запишем и соответствующим образом структурируем выражение погрешности от действия влияющих факторов на выявленные группы элементов:

$$\begin{aligned} \Delta F = & \frac{k_{10}}{k_{20}} \left\{ \left[\frac{z_{40}(z_1 + \Delta z)_0 - z_{20}z_{30}}{z_{30}(z_{20} + z_{40})} \right] \left(\frac{\Delta k_1}{k_{10}} - \frac{\Delta k_2}{k_{20}} \right) + \right. \\ & + \frac{z_{40}}{z_{30}(z_{20} + z_{40})} \left\{ (z_1 + \Delta z) \left[\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta z_3}{z_{30}} \right] + \right. \\ & \left. \left. + \frac{z_{20}[z_{30} + (z_1 + \Delta z)_0]}{(z_{20} + z_{40})} \left[\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta z_3}{z_{30}} \right] \right\} \right\}, \quad (19) \end{aligned}$$

где $\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta(z_1 + \Delta z), \Delta z_2, \Delta z_3, \Delta z_4$ – отклонения параметров соответствующих элементов схемы от номинальных значений под действием влияющих факторов; $k_{10}, k_{20}, (z_1 + \Delta z)_0, z_{20}, z_{30}, z_{40}$ – номинальные значения соответствующих параметров.

В соответствии с критерием (2), устремляя выражение (19) к нулю, выявляем необходимость «дифференциально-симметричного» влияния дестабилизирующих факторов на параметры соответствующих групп элементов:

$$\begin{cases} \left\{ \frac{\Delta k_1}{k_{10}} - \frac{\Delta k_2}{k_{20}} \right\} \rightarrow 0; \\ \left\{ \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta z_3}{z_{30}} \right\} \rightarrow 0; \\ \left\{ \frac{\Delta z_4}{z_{40}} - \frac{\Delta z_2}{z_{20}} \right\} \rightarrow 0, \end{cases} \quad (20)$$

что является аналитическим выражением второго признака представленного выше техноло-

гического метода.

Из (20) получаем условия компенсации дестабилизирующих воздействий на соответствующие группы элементов рассмотренной схемы и, соответственно, на схему в целом:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta k_1}{k_{10}} = \frac{\Delta k_2}{k_{20}}; \quad \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} = \frac{\Delta z_3}{z_{30}}; \\ \frac{\Delta z_2}{z_{20}} = \frac{\Delta z_4}{z_{40}}. \end{aligned} \quad (21)$$

Откуда следуют требования, выполнение которых связано со специальной технологией подбора и размещения комплектующих элементов преобразователя.

2.3. Двухканальный мост с принудительной балансировкой

В схеме, показанной на рис. 3, использован мост с принудительной балансировкой [18]. Он содержит четыре резистивных преобразователя 1–4, один из которых первичный, включенный между инвертирующим и прямым входами операционного усилителя 5. Операционный усилитель 5 подключен своими входами в диагональ моста между преобразователями 1 и 2, 3 и 4, соответственно. Для обеспечения двухканальности 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. Выходы повторителей напряжения 7 и 8 подключены ко входам устройства деления 9 [19].

Напряжения на выходах повторителей напряжения 7 и 8 определяются выражениями:

$$U_1 = k_1 E \left\{ \frac{r_4}{(r_3 + r_4)} \left[1 + \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1} \right] - \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1} \right\}; \quad (22)$$

$$U_2 = k_2 E, \quad (23)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению повторителей напряжения 7 и 8; E

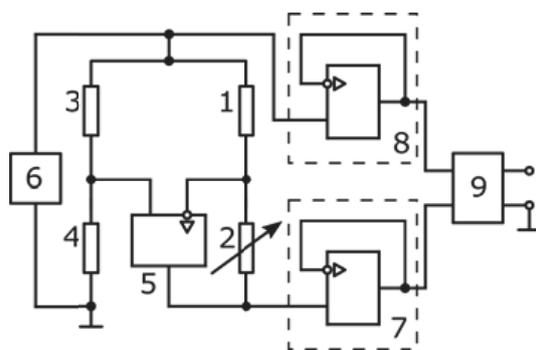


Рис. 3. Двухканальный измерительный мост с принудительной балансировкой

– 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:

$$F = \frac{U_1}{U_2} = \frac{k_1}{k_2} \left\{ \frac{r_4}{(r_3 + r_4)} \left[1 + \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1} \right] - \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1} \right\}. \quad (24)$$

При выполнении условий $k_1 = k_2$ и $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r$ функция преобразования (24) принимает следующий вид:

$$F = -\frac{\Delta r}{2r}. \quad (25)$$

Знак минус говорит о направлении изменения информативного параметра.

Она также линейна во всем диапазоне изменения информативного параметра Δr и не зависит от нестабильности параметров источника питания 6. Последнее подтверждается тождественным выполнением для функции (24) следующего критерия:

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

Для реализации уже опробованной методики запишем и соответствующим образом структурируем выражение погрешности от действия влияющих факторов на соответствующие группы элементов:

$$\Delta F = \frac{[r_{20} r_{40} - (r_1 + \Delta r)_0 r_{30}] \left(\frac{\Delta k_1}{k_{10}} - \frac{\Delta k_2}{k_{20}} \right) + (r_1 + \Delta r)_0 r_{30}}{r_{20} (r_{30} + r_{40})} \times \left[\frac{\Delta r_2}{r_{20}} - \frac{\Delta(r_1 + \Delta r)}{(r_1 + \Delta r)_0} \right] + \frac{r_{30} r_{40} [(r_1 + \Delta r)_0 + r_{20}] \left(\frac{\Delta r_4}{r_{40}} - \frac{\Delta r_3}{r_{30}} \right)}{r_{20} (r_{30} + r_{40})^2}, \quad (26)$$

где $\Delta(r_1 + \Delta r), \Delta r_2, \Delta r_3, \Delta r_4$ – отклонение от номинальных значений $(r_1 + \Delta r)_0, r_{20}, r_{30}, r_{40}$ сопротивлений преобразователей 1...4; $\Delta k_1, \Delta k_2$ – отклонения коэффициентов передачи по напряжению повторителей напряжения 7 и 8 от номинальных значений k_{10}, k_{20} (в данном случае $k_{10} = k_{20} = 1$).

Устремляя выражение (26) к нулю, также выявляем необходимость «дифференциально-симметричного» влияния дестабилизирующих факторов на параметры соответствующих групп элементов:

$$\left\{ \frac{\Delta(r_1 + \Delta r)}{(r_1 + \Delta r)} - \frac{\Delta r_2}{r_{20}} \right\} \rightarrow 0; \quad \left\{ \frac{\Delta r_3}{r_{30}} - \frac{\Delta r_4}{r_{40}} \right\} \rightarrow 0; \quad (27)$$

$$\left\{ \frac{\Delta k_1}{k_{10}} - \frac{\Delta k_2}{k_{20}} \right\} \rightarrow 0.$$

А из (27) следуют условия компенсации воздействия дестабилизирующих факторов на соответствующие группы элементов:

$$\frac{\Delta k_1}{k_{10}} = \frac{\Delta k_2}{k_{20}}; \quad \frac{\Delta(r_1 + \Delta r)}{(r_1 + \Delta r)_0} = \frac{\Delta r_2}{r_{20}}; \quad \frac{\Delta r_3}{r_{30}} = \frac{\Delta r_4}{r_{40}}. \quad (28)$$

Далее, чтобы показать универсальность предлагаемых решений, перейдем к классу измерительных делителей напряжения.

3. ДВУХКАНАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Измерительные делители напряжения относятся к классу параметрических измерительных преобразователей. В литературе также встречается термин полумостовые измерительные преобразователи. Представленные примеры выбраны так, чтобы сохранить единство изложения материала и продолжить тему использования принципа двухканальности в измерительных преобразователях, поднятую на методическом уровне в работе [1]. Обладая существенной простотой, полумостовые преобразователи имеют и недостатки, одним из которых следует считать наличие у них на выходе постоянной неинформативной составляющей при нулевом входном сигнале [20, 21]. Решения, направленные на их устранение, приводят к появлению в схемах дополнительных элементов, которые, в свою очередь, становятся источниками дополнительных погрешностей. Поэтому рассматриваемый здесь технологический метод компенсации влияющих факторов на элементы преобразователей и методика его реализации, безусловно, касаются и этого класса измерительных устройств.

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

Схема двухканального измерительного делителя напряжения, представленная на рис. 4, содержит преобразователи напряжения 1 и 2, один из которых первичный, источник питания 3, повторители напряжения 4 и 5, инвертирующий сумматор 6 и устройства деления 7 [20].

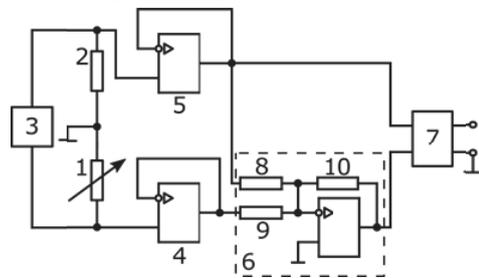


Рис. 4. Двухканальный делитель напряжения с дополнительным сумматором в цепи одного из каналов

Напряжения на выходах инвертирующего сумматора 6 и повторителя напряжения 5, описываются выражениями:

$$U_1 = \frac{E r_3 [k_1 r_1 (z_1 + \Delta z) - k_2 r_2 z_2]}{r_1 r_2 [(z_1 + \Delta z) + z_2]}, \quad (29)$$

$$U_2 = \frac{E k_2 z_2}{[(z_1 + \Delta z) + z_2]}, \quad (30)$$

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, функция преобразования имеет вид:

$$F = \frac{U_1}{U_2} = \frac{r_3 [k_1 r_1 (z_1 + \Delta z) - k_2 r_2 z_2]}{k_2 r_1 r_2 z_2}. \quad (31)$$

При $k_1 = k_2, r_1 = r_2, z_1 = z_2 = z$ выражение (31) приобретает вид:

$$F = \frac{r_3}{r_1} \frac{\Delta z}{z}. \quad (32)$$

Из (32) видно, что данная схема, в отличие от ее прототипа [22], не создает постоянной неинформативной составляющей на выходе. Но это преимущество оплачено появлением в одном из каналов инвертирующего сумматора с группой навесных элементов 8, 9 и 10, нестабильность которых в совокупности с нестабильностью других элементов схемы может стать источником дополнительной погрешности.

Запишем выражение погрешности от действия влияющих факторов на соответствующие группы элементов представленной на рис. 4 схемы:

$$\Delta F = \frac{r_3}{r_1} \frac{(z_1 + \Delta z)_0}{z_2} \left\{ \left(\frac{\Delta k_1 - \Delta k_2}{k_0} \right) + \left[\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta z_2}{z_2} \right] + \left(\frac{\Delta r_3}{r_3} - \frac{\Delta r_2}{r_2} \right) + \frac{z_2}{(z_1 + \Delta z)_0} \left(\frac{\Delta r_1}{r_1} - \frac{\Delta r_3}{r_3} \right) \right\}, \quad (33)$$

где $\Delta(z_1 + \Delta z), \Delta z_2$ – отклонения под действием дестабилизирующих факторов параметров преобразователей 1 и 2 от номинальных значений $(z_1 + \Delta z)_0, z_2$; $\Delta k_1, \Delta k_2$ – отклонения коэффициентов передач по напряжению повторителей напряжения 4 и 5 от номинального значения k_0 ; $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3$ – отклонения значений сопротивлений резисторов 8,9,10 сумматора 6 от номинальных значений r_1, r_2, r_3 вследствие действия возмущающих факторов.

Устремляя выражение (33) к нулю, выявляем необходимость обеспечения «дифференциально-симметричного» влияния дестабилизирующих факторов на параметры соответствующих групп элементов:

$$\left\{ \frac{\Delta k_1}{k_0} - \frac{\Delta k_2}{k_0} \right\} \rightarrow 0; \quad \left\{ \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta z_2}{z_2} \right\} \rightarrow 0; \quad (34)$$

$$\left\{ \left(\frac{\Delta r_3}{r_3} - \frac{\Delta r_2}{r_2} \right) \right\} \rightarrow 0; \quad \left\{ \left(\frac{\Delta r_1}{r_1} - \frac{\Delta r_3}{r_3} \right) \right\} \rightarrow 0.$$

Из (34) получаем:

$$\frac{\Delta k_1}{k_{10}} = \frac{\Delta k_2}{k_{10}}; \quad \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} = \frac{\Delta z_2}{z_2};$$

$$\frac{\Delta r_1}{r_{10}} = \frac{\Delta r_2}{r_{20}} = \frac{\Delta r_3}{r_{30}}. \quad (35)$$

Последние показывают, что использование в схеме дополнительных элементов, являющихся потенциальными приемниками возмущающих воздействий (резисторы 8,9 и 10), приводит к необходимости выполнения дополнительных условий для их компенсации.

3.2. Двухканальный измерительный делитель напряжения с перекрестными обратными связями

Измерительный преобразователь [21], схема которого дана на рис. 5, также является двухканальным. Он 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. Однако, несмотря на структурную реализацию принципа двухканальности, компенсации нестабильности всех входящих в схему элементов не происходит. Поэтому здесь, как и в рассмотренных выше случаях, представляется необходимым реализовать принцип двухканальности технологическим методом.

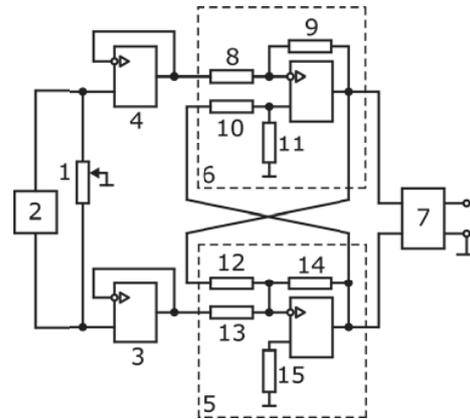


Рис. 5. Двухканальный делитель напряжения с перекрестными обратными связями

Методика выявления технологических требований предполагает возможность получения в аналитическом виде выражения погрешности от действия влияющих факторов на все про-

блемные элементы, которое будет использовано в критерии (2). Для этого запишем функцию преобразования устройства:

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

где U_1 и U_2 – функции преобразования каналов преобразователя, определяемые выражениями:

$$U_1 = -k_1 E \frac{(z - \Delta z)}{2z}; \quad (37)$$

$$U_2 = k_2 E \frac{(z + \Delta z)}{2z}, \quad (38)$$

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 $r_1 \dots r_7$ – сопротивления резисторов 8...14).

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

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

и не содержит неинформативной составляющей при нулевом входном сигнале.

Запишем и соответствующим образом структурируем выражение погрешности от действия влияющих факторов на сходные группы элементов схемы:

$$\begin{aligned} \Delta F = & \frac{(z + \Delta z)_0 (z - \Delta z)_0}{2r_0^2} \left\{ \left(\frac{\Delta k_1}{k_{10}} - \frac{\Delta k_2}{k_{20}} \right) + \right. \\ & \left. + \left[\frac{\Delta(z + \Delta z)}{(z + \Delta z)_0} - \frac{\Delta(z - \Delta z)}{(z - \Delta z)_0} \right] + \left(\frac{\Delta r_1}{r_{10}} - \frac{\Delta r_2}{r_{20}} \right) \right\} + \\ & + \frac{(z + \Delta z)_0}{4r_0} \left(\frac{\Delta r_4}{r_{40}} - \frac{\Delta r_3}{r_{30}} \right) + \left[\frac{(z + \Delta z)_0^2}{8r_0^2} - \frac{(z + \Delta z)_0 (z - \Delta z)_0}{4r_0^2} \right] \times (39) \\ & \times \left(\frac{\Delta r_6}{r_{60}} - \frac{\Delta r_5}{r_{50}} \right) + \frac{(z - \Delta z)_0^2}{8r_0^2} \left(\frac{\Delta r_7}{r_{70}} - \frac{\Delta r_5}{r_{50}} \right) + \\ & + \left[\frac{(z - \Delta z)_0^2}{8r_0^2} + \frac{(z + \Delta z)_0 (z - \Delta z)_0}{4r_0^2} \right] \left(\frac{\Delta r_7}{r_{70}} - \frac{\Delta r_6}{r_{60}} \right), \end{aligned}$$

где $\Delta(z - \Delta z)$, $\Delta(z + \Delta z)$, $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3, \Delta r_4, \Delta r_5, \Delta r_6, \Delta r_7$, $\Delta k_1, \Delta k_2$ (индексы при Δr соответствуют в порядке возрастания резисторам 8...14, а при Δk – преобразователям 3 и 4) – отклонения пара-

метров соответствующих элементов схемы от номинальных значений $(z - \Delta z)_0, (z + \Delta z)_0, r_{10}, r_{20}, r_{30}, r_{40}, r_{50}, r_{60}, r_{70}, k_{10} = k_{20} = k_0$ (в данном случае $r_{10} = r_{20} = r_{30} = r_{40} = r_{50} = r_{60} = r_{70} = r_0$).

В соответствии с критерием (2), устремляя (39) к нулю, выявляем следующие требования:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta k_1}{k_{10}} = \frac{\Delta k_2}{k_{20}}; \quad & \left\{ \frac{\Delta(z + \Delta z)}{(z + \Delta z)_0} - \frac{\Delta(z - \Delta z)}{(z - \Delta z)_0} \right\} \rightarrow 0; \\ \left\{ \frac{\Delta r_1}{r_{10}} - \frac{\Delta r_2}{r_{20}} \right\} \rightarrow 0; \quad & \left\{ \frac{\Delta r_3}{r_{30}} - \frac{\Delta r_4}{r_{40}} \right\} \rightarrow 0; \\ \left\{ \frac{\Delta r_6}{r_{60}} - \frac{\Delta r_5}{r_{50}} \right\} \rightarrow 0; \quad & \left\{ \frac{\Delta r_7}{r_{70}} - \frac{\Delta r_5}{r_{50}} \right\} \rightarrow 0; \\ \left\{ \frac{\Delta r_7}{r_{70}} - \frac{\Delta r_6}{r_{60}} \right\} \rightarrow 0. \end{aligned} \quad (40)$$

Из (40) следуют условия компенсации действия влияющих факторов на соответствующие группы элементов последнего преобразователя:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta k_1}{k_{10}} = \frac{\Delta k_2}{k_{20}}; \quad & \frac{\Delta(z + \Delta z)}{(z + \Delta z)_0} = \frac{\Delta(z - \Delta z)}{(z - \Delta z)_0}; \\ \frac{\Delta r_1}{r_{10}} = \frac{\Delta r_2}{r_{20}}; \quad & \frac{\Delta r_3}{r_{30}} = \frac{\Delta r_4}{r_{40}}; \\ \frac{\Delta r_5}{r_{50}} = \frac{\Delta r_6}{r_{60}} = \frac{\Delta r_7}{r_{70}}. \end{aligned} \quad (41)$$

Здесь, как и ранее, видим, что появление дополнительных элементов в схеме влечет за собой необходимость выполнения новых условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ условий компенсации действия влияющих факторов на соответствующие группы элементов рассмотренных измерительных преобразователей, которые получены в соответствии с общей методикой и представлены выражениями (12), (13), (21), (28), (35), (41), позволяет определить возможности их физической реализации. В общем случае для групп выявленных «парных» элементов можно сформулировать следующие требования:

- элементы, составляющие группу, должны быть технологически идентичны, например, выполнены из одного и того же материала, изготовлены на основе идентичных комплектующих, взяты из одной партии и т.д.;
- элементы, составляющие группу, должны находиться в идентичных условиях относительно любых возмущающих воздействий;
- активные элементы, составляющие группу, должны иметь общий источник питания.

По существу все перечисленные требования обеспечивают «симметрию» влияния различных факторов на выявленные группы элементов, что является своеобразной реализацией принципа двухканальности.

Конкретная технология доведения устройств до возможно более строгого выполнения требований вида (3) и, в частности, (12), (13), (21), (28), (35), (41), обеспечивается и на уровне конструкторской проработки состава проектируемого устройства, и на уровне технологии его изготовления, что по существу и составляет «ноу-хау» в каждом конкретном случае. В частности, если речь идет о группе элементов, включенных в плечи мостов или являющихся группой навесных резисторов в дифференциальных усилителях и сумматорах, то, помимо использования элементов одной марки и из одной партии, следует на уровне технологии решить вопрос их размещения в пространстве таким образом, чтобы обеспечить «симметрию» воздействия на них изменений температуры, давления, радиации и других подобных влияющих факторов.

Рассмотренный метод позволит не только повысить точность измерений в не нормальных условиях эксплуатации, но позволяет надеяться на приемлемые результаты измерения в условиях, когда характер и физический принцип влияющих факторов априори неизвестны. Имеются в виду измерения в космосе и глубоком космосе без участия человека, в глубинах океанов, в установках ядерной энергетики, где в случае аварийных ситуаций возможны резкие изменения условий эксплуатации.

Следует отметить, что представленный здесь метод в плане его реализации носит универсальный характер и, несомненно, не ограничивается приведенными примерами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нестеров В.Н., Ли А.Р.* Теория и практика построения инвариантных измерительных преобразователей и систем на основе принципа двухканальности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т.18. № 4(7). С. 1414-1422.
2. *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.
3. *Нестеров В.Н.* Структурный и технологический методы в задачах построения инвариантных измерительных преобразователей // Измерительная техника. 2007. № 2. С. 8-12.
4. *Нестеров В.Н.* Структурно-технологический метод синтеза инвариантных измерительных преобразователей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. Том 9. № 3. С. 96-104.
5. *Нестеров В.Н.* Системный подход к проектированию параметрических измерительных преобразователей: синтез, анализ и применения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2002. Вып. № 6. С. 19-27.
6. *Нестеров В.Н.* Системный подход в проектировании тензорезисторных измерителей крутящего момента: синтез и анализ // Измерительная техника. 2001. № 8. С. 41-45.
7. *Нестеров В.Н.* Двухканальные параметрические измерительные преобразователи с линейными функциями преобразования // Измерительная техника. 1999. № 5. С. 39-45.
8. *Нестеров В.Н.* Инвариантные параметрические измерительные преобразователи с линейными функциями преобразования // Измерительная техника. 1993. № 3. С. 52-55.
9. *Нестеров В.Н.* Инвариантные делители напряжения для измерительных приборов // Приборы и системы управления. 1995. № 12. С. 30-31.
10. *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.
11. *Петров Б.Н., Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.* Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: Наука, 1976. 244 с.
12. *Нестеров В.Н.* Новый класс инвариантных измерительных преобразователей: методы построения и реализация для приборов и систем специального назначения // Информационные, измерительные и управляющие системы. Научно-техн. сб. Самарского отделения Поволжского центра Метрологической академии России [под ред. проф. В.Н. Нестерова]. Самара: Самарский научный центр РАН, 2007. Вып. 3. С. 18-37.
13. *Хрусталева М.М.* Необходимые и достаточные условия слабой инвариантности // Автоматика и телемеханика. 1968. № 4. С. 17-22.
14. *Ивахненко А.Г.* Связь теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем // Автоматика. 1960. № 5. С. 35-40.
15. *Кульбакин В.С.* О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах // ДАН СССР. 1948. Т.60. № 2. С.231-234.
16. *Нестеров В.Н.* Способ построения инвариантной измерительной цепи и инвариантный измерительный мост Нестерова В.Н.: Пат. 1795375 (РФ). 1993.
17. *Нестеров В.Н.* Инвариантный измерительный мост: Пат. 2071064 (РФ).1996.
18. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных

- с компьютерами IBM PC: Пер. с англ. [под ред. У.Томпкинса, Дж.Уэбстера]. М.: Мир, 1992. 592с.
19. Нестеров В.Н. Инвариантный измерительный мост: Пат.2072730 (РФ). 1997.
20. Нестеров В.Н. Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя напряжения: Пат. 2118826 (РФ). 1998.
21. Нестеров В.Н. Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя напряжения: Пат. 2117951 (РФ). 1998.
22. Нестеров В.Н. Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя: Пат. 2121148 (РФ). 1998.

THEORETICAL BASES OF DESIGNING OF QUASIINVARIANT MEASUREMENT TRANSDUCERS AND SYSTEMS BASED ON THE TWO-CHANNEL PRINCIPLE

© 2017 V.N. Nesterov, A.R. Li

JSC "Samara Electromechanical Plant"

The article presents the theoretical bases designing of quasi-invariant measurement transducers based on the principle of two-channel, which was proposed by Academician B.N. Petrov. The method considered in this work was called technological. It is used in cases where the conditions of absolute invariance of measurement transducers and systems cannot be realized. In parallel with the method, a technique is provided for identifying quasi-invariance conditions, essentially representing a «know how» in each specific case. The method and technique are illustrated by examples in the class of two-channel bridges and half-bridge measurement transducers.

Keywords: quasi-invariant systems, the principle of two-channel technology, the technological method, measurement transducers, 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, an Engineer by Patent and Licensing Work of Technical Research Centre of JSC «Samara Electromechanical Plant». E-mail: lika-li@mail.ru