ИНВАРИАНТНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В.Н. Нестеров, *д.т.н., профессор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, nesterov.ntc@gmail.com.*

УДК 621.317.08

Аннотация. В статье представлен новый класс инвариантных параметрических измерительных преобразователей, который свободен от свойственных параметрическим преобразователям недостатков. Класс базируется на сформулированном в теории инвариантности принципе двухканальности и имеет перспективы дальнейшего развития. Преобразователи данного вида имеют широкий спектр применений, однако в особенности их применение перспективно в условиях наличия внешних возмущений неизвестной физической природы. Например, в условиях глубокого космоса, когда исследовательский автономный аппарат оказывается под воздействием факторов, предусмотреть которые невозможно заранее.

Ключевые слова: теория инвариантности; принцип двухканальности; измерения, параметрические преобразователи; компенсация возмущающих факторов.

INVARIANT PARAMETRIC TRANSDUCERS

Vladimir Nesterov*, Doctor of Technics, Professor, Volga State University of Telecommunications and Informatics.*

Annotation. The new class of invariant parametric transducers is presented in this paper. This class is free from the disadvantages inherent in parametric transducers. The class is based on the two-channel principle that was formulated in the invariance theory and has prospects for further development. Converters of this type have a wide range of applications; however, in particular, their use is promising in the presence of external disturbances of an unknown physical nature. For example, this applies to deep space, when an autonomous research apparatus is affected by factors that cannot be foreseen in advance.

Keywords: theory of invariance; the principle of two-channel; measurements, parametric transducers; disturbance compensation.

Введение

Вопросы точности в теории преобразователей всегда были и будут актуальны независимо от места, времени и вида их применений. Этим объясняется огромное число работ, количество которых непрерывно нарастает по мере расширения человечеством области своих интересов. Освоение космического пространства и в перспективе глубокого космоса, океанов, технологий, сопровождающихся множеством неблагоприятных факторов, иногда неизвестной физической природы, ставит перед наукой о преобразователях новые задачи. Это, несомненно, будет актуально всегда применительно к сфере измерений, поскольку без измерений невозможно осуществить ни одного технологического процесса, невозможно реализовать ни одного исследовательского проекта.

Для решения проблемы повышения точности измерений были разработаны различные методы [1-5]: вспомогательных измерений, образцовых мер, тестовые и др., правильное применение которых позволяет существенно уменьшить погрешности измерительных устройств в ненормальных условиях эксплуатации.

Однако физическая реализуемость каждого из них требует выполнения определённых условий, без которых эффективность применения не только уменьшается, но может привести к противоположному результату. Например, метод вспомогательных измерений требует знания функций влияния величин, вспомогательные измерения которых позволяют ввести соответствующую коррекцию. При этом каждый вспомогательный канал вносит свою долю в суммарную погрешность измерительного устройства. В методе образцовых мер необходимо отключать от входа устройства измеряемую величину и подавать на вход образцовую меру, что не всегда осуществимо на практике [6]. Тестовый метод требует дополнительного канала (каналов), на который поступает измеряемая величина, функционально связанная с образцовым тестом [7].

Особняком в теории измерений стоят методы теории инвариантности, направленные на компенсацию воздействия на систему внешних возмущений. Изначально эти методы нашли применение в теории автоматического регулирования [8-10]. Однако очень скоро появились работы, в которых были высказаны соображения о связи теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем [11, 12]. Методы теории инвариантности и, в частности, принцип двухканальности открыли новые перспективы в теории измерений и позволили подойти к решению задач повышения точности на совершенно иной теоретической базе, нежели в классической теории измерений. Иногда возникают задачи обеспечения высокой точности в условиях наличия внешних возмущений неизвестной физической природы. Например, в условиях глубокого космоса, когда исследовательский автономный аппарат оказывается под воздействием факторов, предусмотреть которые невозможно заранее. Да и на Земле встречается множество применений, в которых предусмотреть возникновение внешних возмущающих факторов не всегда представляется возможным. Более того, классическая теория измерений для построения измерительного устройства предполагает уравнение измерения, наличие в нем меры и знание понятия числа, что само по себе является ограничением и сводит на нет само понятие измерения, когда такой меры по неизвестным заранее причинам не существует. Но решение этих задач на основе теории инвариантности выходит за пределы настоящей работы, хотя такие решения просматриваются и требуют соответствующего теоретического подтверждения. В данном случае рассмотрим класс двухканальных параметрических измерительных преобразователей, базой создания которых послужили принципы теории инвариантности, которые существенно расширяют их теоретические и практические возможности. В частности, в известном классическом учебнике по измерительной технике, написанном под редакцией профессора П.В. Новицкого [13], отмечено, что практическое применения параметрических измерительных преобразователей существенно ограничивает в большинстве случаев нелинейность их функций преобразования и необходимость прецизионного источника питания. Схемы параметрических измерительных преобразователей, которые здесь будут представлены, все оригинальны и являются яркими представителями упомянутого выше класса. Ограничения на объем не позволяют представить весь класс, поэтому изложение будет сопровождаться ссылками на дополнительные источники.

Двухканальные параметрические измерительные преобразователи

На рис. 1 представлен двухканальный неравновесный измерительный мост с одним рабочим плечом.

Сигнал первого канала, как обычно для неравновесных измерительных мостов, снимается с измерительной диагонали, а второй – с преобразователя 3:

$$U_1 = \frac{E\left(z_1 z_4 - z_2 z_3 + z_4 \Delta z\right)}{\left(z_2 + z_4\right)\left[z_3 + \left(z_1 + \Delta z\right)\right]}; \qquad U_2 = \frac{E\, z_3}{\left[z_3 + \left(z_1 + \Delta z\right)\right]}, \tag{1}$$

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, с выходов повторителей напряжения 6 и 7 на входы устройства деления поступают сигналы:

$$\left.\begin{aligned} U_1^* &= k_1 U_1; \\ U_2^* &= k_2 U_2, \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

где: k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению преобразователей (повторителей) напряжения 6 и 7.

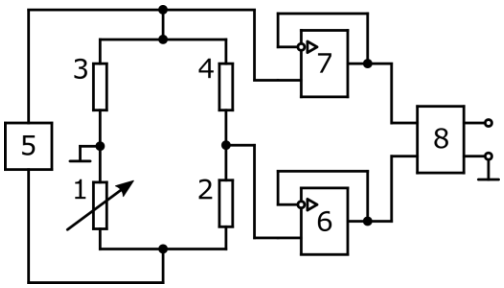

Рисунок 1

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

Соответственно, результирующая функция преобразования устройства имеет вид:

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{k_1}{k_2} \frac{\left(z_1 z_4 - z_2 z_3 + z_4 \Delta z\right)}{z_3\left(z_2 + z_4\right)}. \tag{3}$$

При выполнении условий $k_1 = k_2$ и $z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z$ функция преобразования (формула 3) приобретает вид:

$$F = \Delta z / \left(2z\right). \tag{4}$$

Она абсолютно инвариантна относительно нестабильности ЭДС источника питания E, поскольку для (3) выполняется критерий:

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial E} \Delta E \equiv 0\,. \tag{5}$$

Как видно из (формула 1) нелинейная составляющая $\Omega = 1/\left[z_3 + \left(z_1 + \Delta z\right)\right]$ «симметрично» входит в функции преобразования U_1^* и U_2^* обоих измерительных каналов и, соответственно, мы имеем строгое выполнение критерия

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial \Omega} \Delta \Omega + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial \Omega} \Delta \Omega \equiv 0\,. \tag{6}$$

Как следствие, функция преобразования данного измерительного моста линейна во всем диапазоне изменения информативного параметра Δz.

На рис. 2 показан двухканальный неравновесный параллельно-симметричный мост с двумя рабочими плечами. Устройство реализовано на основе способа построения инвариантной измерительной цепи [14], особенность которого состоит в том, что с одного канала измерительного моста снимается напряжение, пропорциональное разности токов в его плечах, а с другого – пропорциональное сумме этих токов.

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: $z\,i = z\left(i_1 + i_2\right)$, где i – ток в диагонали питания.

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

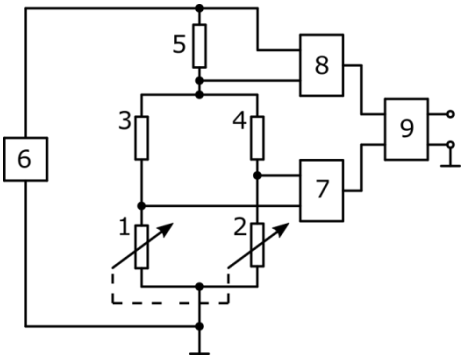

Рисунок 2

На рис. 2 инвариантный измерительный мост Нестерова В.Н. [14]: представлен в виде: 1,2 – дифференциально включенные первичные преобразователи; 3, 4, 5 – преобразователи с постоянными параметрами; 6 – источник питания; 7, 8 – дифференциальные усилители напряжения; 9 – устройство деления.

Напряжения на входах дифференциальных усилителей напряжения 7 и 8 определяются выражениями:

$$U_1 = \frac{\left(E - z_5 i\right)\left[\left(z_1 + \Delta z\right)z_4 - \left(z_2 - \Delta z\right)z_3\right]}{\left[\left(z_1 + \Delta z\right) + z_3\right]\left[\left(z_2 - \Delta z\right) + z_4\right]}; \tag{7}$$

$$U_2 = \frac{\left(E - z_5 i\right)z_5\left[\left(z_1 + \Delta z\right) + \left(z_2 - \Delta z\right) + z_3 + z_4\right]}{\left[\left(z_1 + \Delta z\right) + z_3\right]\left[\left(z_2 - \Delta z\right) + z_4\right]}, \tag{8}$$

где: $\frac{(E - z_5 i)}{[(z_1 + \Delta z) + z_3][(z_2 - \Delta z) + z_4]}$ – симметричная нелинейная составляющая 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 и z_2 начальные значения преобразователей 1 и 2; Δz – информативное изменение параметров z_1 и z_2.

Сигналы $U_1^* = k_1 U_1$ и $U_2^* = k_2 U_2$ с выходов, соответственно, дифференциальных усилителей напряжения 7 и 8 поступают на входы устройства деления 9, на выходе которого получаем:

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{k_1}{k_2} \frac{[(z_1 + \Delta z) z_4 - (z_2 - \Delta z) z_3]}{z_5 [(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3 + z_4]}, \quad (9)$$

где: k_1 и k_2 – коэффициенты передачи дифференциальных усилителей напряжения 7 и 8.

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

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{\Delta z}{(z_0 + z)}. \quad (10)$$

Она абсолютно инвариантна относительно нестабильности ЭДС источника питания E (формула 5), что подтверждается тождественным равенством нулю 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 функции преобразования (формула 9).

Также для функции преобразования (формула 9) выполняется критерий (формула 6):

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

где: $\Omega = (E - z_5 i) / [(z_1 + \Delta z) + z_3][(z_2 - \Delta z) + z_4]$ – нелинейная составляющая, входящая в функции преобразования измерительных каналов $U_1^* = k_1 U_1$ и $U_2^* = k_2 U_2$

Поэтому функция преобразования данного двухканального измерительного моста линейна во всем диапазоне изменения информативного изменения Δz параметров z_1 и z_2 дифференциально включенных первичных преобразователей 1 и 2.

В основе схемы, представленной на рис. 3, использован мост с принудительной балансировкой [15]. 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.

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

$$U_1 = k_1 E \left\{ \frac{r_4}{(r_3 + r_4)} \left[1 + \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1} \right] - \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1} \right\}; \quad (11)$$

$$U_1 = k_2 E \ , \quad (12)$$

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.

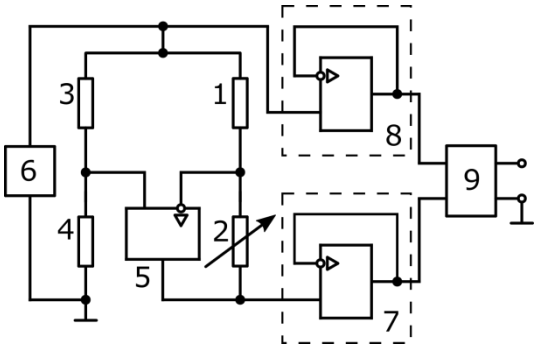

Рисунок 3

На рис. 3 двухканальный измерительный мост с принудительной балансировкой представлен в виде: 1-4 – резисторы; 5 – операционный усилитель; 6 – источник питания; 7, 8 – повторители напряжения; 9 – устройство деления.

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

$$F = \frac{U_1}{U_2} = \frac{k_1}{k_2} \left\{ \frac{r_4}{(r_3 + r_4)} \left[1 + \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1} \right] - \frac{(r_2 + \Delta r)}{r_1} \right\}. \quad (13)$$

При выполнении условий $k_1 = k_2$ и $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r$ функция преобразования (формула 13) принимает следующий вид:

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

Она также линейна во всем диапазоне изменения информативного параметра Δr и не зависит от нестабильности параметров источника питания 6. Последнее подтверждается выполнением следующего критерия для функции преобразования (формула 13) :

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

Знак минус показывает направление изменения информативного параметра.

Измерительный преобразователь, показанный на рис. 4, также реализует способ построения инвариантной измерительной цепи [14]. Устройство представляет собой двухканальную систему, в которой возмущающий фактор – нестабильность питания, передается «симметрично» в оба канала. Соответственно, выражения для напряжений на выходах повторителей напряжения 3 и 4 имеют вид:

$$U_1 = -k_1 E \frac{(z - \Delta z)}{2z}; \tag{15}$$

$$U_2 = k_2 E \frac{(z + \Delta z)}{2z}, \tag{16}$$

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 первичного 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).

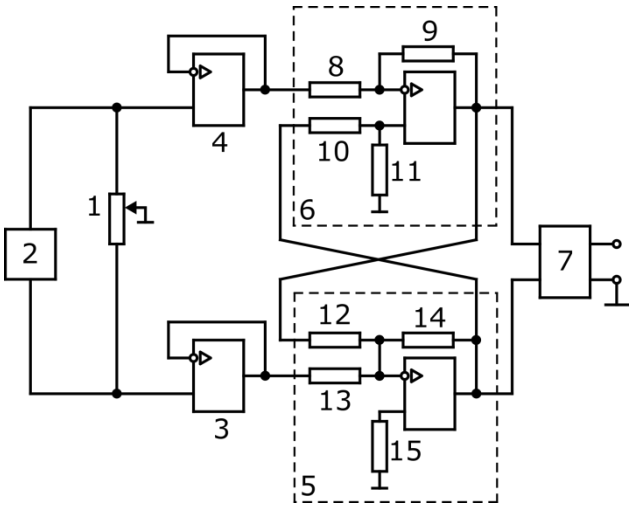

Рисунок 4

На рис. 4 двухканальный делитель напряжения с перекрестными обратными связями представлен в следующем виде [16]: 1 – дифференциальный первичный преобразователь; 2 – источник питания; 3 и 4 – повторители напряжения; 5 – инвертирующий сумматор напряжения; 6 – дифференциальные усилитель напряжения; 7 – устройство деления; 8…15 – резисторы.

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

$$F = \frac{(U_2 + U_1)}{(U_2 - U_1)} = \frac{\Delta z}{z}. \tag{17}$$

Как видно из выражения (формула 17), функция преобразователя устройства абсолютно инвариантна относительно нестабильности параметров источника питания 2, что подтверждается выполнением следующего критерия:

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

Следует отметить еще один положительный результат, который достигнут в устройствах благодаря использованию второго канала. Этот результат заключается в линеаризации результирующей функции преобразования устройства при исходной нелинейности любого из входящего в него каналов.

Заключение

Как видно из приведенного материала, сформулированный авторами теории инвариантности принцип двухканальности нашел благодатную почву в теории измерений. Имеющиеся в этом направлении последние публикации [17-19], несомненно, дополняют представленный здесь материал, раскрывая все новые и новые возможности применений. Использование принципа двухканальности позволило синтезировать новый класс инвариантных параметрических измерительных преобразователей, свободных от традиционных недостатков, свойственных классу параметрических преобразователей в составе неравновесных измерительных мостов и делителей напряжения.

В более ранних публикациях отмечалось, что наличие двух или более каналов в устройствах является необходимым, но не достаточным условием обеспечения их инвариантности относительно тех или иных влияющих факторов. Поэтому принцип двухканальности развит до методического уровня, где обосновано и нахождение необходимых и достаточных условий обеспечения инвариантности и квазиинвариантности систем относительно соответствующих возмущающих воздействий [20]. Отметим, не всегда и не во всех случаях удается решить вопросы физической реализуемости совершенно правильно сформулированных условий инвариантности. Иногда этому препятствует жесткость требований к исполнению какого-либо условия, как, например, необходимость «симметричной» передачи возмущающего воздействия от общего источника в оба канала системы, что характерно для реализованного в рассмотренных примерах структурного метода. Поэтому потенциальные возможности принципа двухканальности далеко не раскрыты и требуют дальнейшего исследования.

Литература

1. Бондаренко Л.Н., Нефедьев Д.И. Анализ тестовых методов повышения точности измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2014. – №1 (7). – С. 15-20.
2. Блокин-Мечталин Ю.К. Методы и средства повышения точности измерительных преобразователей и систем для экспериментальной аэродинамики // Датчики и системы, 2011. – № 7. – С. 8-18.
3. Купер В.Я., Рубцов М.Г. Алгоритмические методы повышения точности измерений на основе обратных интерполяционных моделей // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2010. – № 3 (28). – С. 67-72.
4. Ашанин В.Н., Ларкин С.Е., Регеда О.Н. Коррекция погрешностей измерительных цепей параметрических датчиков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2016. – № 2 (16). – С. 103-109.
5. Чекушкин В.В., Булкин В.В. Повышение точности измерительных систем с нестабильными параметрами // Измерительная техника, 2006. – № 1. – С. 7-11.
6. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 199 с.
7. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.

8. Лузин Н.Н., Кузнецов П.И. К абсолютной инвариантности и инвариантности до ε в теории дифференциальных уравнений / Докл. АН СССР, 1946. – Т. 51. – № 5. – С. 331-333.
9. Кулебакин В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах // ДАН СССР, 1948. – Т. 60. – № 2. – С. 231-234.
10. Петров Б.Н., Кухтенко А.И. Структуры абсолютно инвариантных систем и условия их физической реализуемости // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Всесоюз. совещания. – М.: Наука, 1964. – С.24-28.
11. Ивахненко А.Г. Связь теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем // Автоматика, 1960. – № 5. – С. 35-40.
12. Петров Б.Н., Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Принцип инвариантности в измерительной технике. – М.: Наука, 1976. – 244 с.
13. Новикого П.В. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. проф. П.В. Новикого. – Л.: Энергия, 1975. – 576 С.
14. Пат. 1795375 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Способ построения инвариантной измерительной цепи и инвариантный измерительный мост Нестерова В.Н. / В.Н. Нестеров. – №4828085/21; Заявл. 24.05.90; Опубл. 15.02.93. – Бюл. №6.
15. Пат. 2072730 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Инвариантный измерительный мост / В.Н. Нестеров. – №940049119/21; Заявл. 10.02.94; Опубл. 27.01.97. – Бюл. №3.
16. Пат. 2117951 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя напряжения / В.Н. Нестеров. – №93001746/09; Заявл. 11.01.93; Опубл. 20.08.98.
17. 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.
18. Нестеров В.Н. От принципа двухканальности к теории построения инвариантных измерительных систем // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2020. – № 4. – С. 56-67.
19. Nesterov V.N., Li A.R. Application of the Two-Channel Principle in Measuring Devices to Compensate for Disturbing Influences of Unknown Physical Nature // Devices and Methods of Measurements, 2020. – 11(3). – P. 128-135. Doi: 10.21122/2220-9506-2020-11-3-228-235.
20. Нестеров В.Н. Моделирование инвариантных и квазиинвариантных систем на основе принципа многоканальности // Прикладная физика и математика, 2020. – № 5. – С. 32-35.