

От принципа двухканальности к теории построения инвариантных измерительных систем

В.Н. Нестеров^{1,2,3}

¹ АО «Самарский электромеханический завод»
443099, Россия, г. Самара,
ул. Ст. Разина, 16

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

³ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Россия, г. Самара,
Московское шоссе, 34

Аннотация – В статье представлены теоретические основы построения инвариантных и квазиинвариантных относительно возмущающих воздействий измерительных систем. Дана историческая справка, отражающая зарождение, эволюцию и распространение методов теории инвариантности от систем автоматического управления и регулирования к информационно-измерительным системам и к измерениям в целом. На примерах структурного и технологического методов, по которым сформулированы формальные методические признаки их физической реализуемости, показаны возможности новых применений сформулированного академиком Б.Н. Петровым принципа двухканальности. Даны теоретические основы и способ линеаризации принципиально нелинейных функций преобразования параметрических измерительных преобразователей, в основе которых также лежит принцип двухканальности. Все теоретические положения подкреплены практическими примерами, распространяющими возможности рассмотренных методов на весь класс параметрических измерительных преобразователей в составе неравновесных измерительных мостов и делителей напряжения.

Ключевые слова – теория инвариантности, принцип двухканальности, структурный метод, технологический метод, метод линеаризации, возмущающие воздействия, измерительные системы, параметрические преобразователи.

Введение

Для обеспечения работы электронных систем и преобразователей в жестких эксплуатационных условиях без участия человека необходимы поиск и реализация новых подходов к их проектированию. Это объясняется тем, что возмущающие воздействия со стороны неизвестных заранее процессов или явлений могут привести к отклонениям в работе систем, в том числе к потерям или искажению информации, затрудняющим принятие правильных решений и команд управления. Новое зачастую следует искать в старом, интерпретируя известные принципы к новым задачам и их решениям.

Принцип двухканальности, сформулированный академиком Б.Н. Петровым применительно к измерительным системам [1], относится к тем базовым положениям, значение которых не умаляется с течением времени. Напротив он является основой, на которой могут быть построены новые методы формирования систем, реализующих помимо своей основной функции функцию инвариантности относительно возмущающих факторов, препятствующих выполнению главной задачи.

Чтобы отразить диалектику развития данного подхода, обратимся к истории. Методы теории инвариантности возникли в теории автоматического регулирования и управления. Пионерский для того времени подход был предложен профессором Г.В. Щипановым [2]. Его исследования поначалу не нашли поддержки и вызвали жестокую дискуссию. Однако академики В.С. Кулебакин и Н.Н. Лузин высказали особое мнение, указав на необходимость дальнейших исследований по условиям компенсации [3]. Справедливость идей профессора Г.В. Щипанова была подтверждена в дальнейшем [4–7]. Сейчас это направление в теории автоматического управления и регулирования присутствует и развивается [8].

Научное направление, связанное с идеями компенсации возмущающих воздействий на системы автоматического управления, продолжило свое развитие в смежных областях науки. В 1960 г. в журнале «Автоматика» была опубликована статья профессора А.Г. Ивахненко, в которой были рассмотрены условия инвариантности уравновешенного измерительного моста относительно неустойчивости источника питания [9]. Монография

академика Б.Н. Петрова с соавторами [1] привнесла новый взгляд на вопросы повышения точности измерительных систем, который в противовес методам коррекции погрешностей измерений [10] ориентирован на компенсацию факторов, вызывающих возникновение погрешностей. В дальнейшем эти направления развивались параллельно, причем выбор того или иного из них определялся во многом личными предпочтениями исследователей [11–13]. Однако, как и методы автоматической коррекции погрешностей, методы, направленные на компенсацию воздействия возмущающих факторов на системы, не являются универсальными. Например, условия инвариантности измерительного моста, рассмотренного в работе профессора А.Г. Ивахненко [9], выполняются в случае его полного уравнивания. В последние годы данное направление в теории измерений получило дальнейшее развитие. Количество публикаций в этой области растет. Отметим лишь некоторые [12–19].

В общем случае принцип двухканальности может быть проиллюстрирован моделью системы, структура которой показана на рис. 1 [20].

Принцип двухканальности является необходимым, но недостаточным условием компенсации возмущающих воздействий на измерительные устройства. Объединение необходимых и достаточных условий, направленных на компенсацию тех или иных возмущающих факторов, позволяет сформулировать и реализовать методические признаки, которые становятся базой соответствующих методов и реализуются в соответствующем классе инвариантных устройств и систем.

Анализируя различные технические решения, в которых в том или ином виде представлен принцип двухканальности, можно прийти к выводу, что его потенциальные возможности далеко не исчерпаны, а теоретическое и практическое развитие во многом связано с возникновением новых задач и сфер использования.

Покажем возможности принципа двухканальности на примере структурного и технологического методов, каждый из которых обладает собственным набором методических признаков и направлен на компенсацию возмущающих факторов, имеющих разные источники и отличающихся механизмом влияния на качество работы систем.

Предварительно заметим, что в модели, приведенной на рис. 1, присутствует интересная особенность. Эта особенность заключается в том, что модель предполагает «симметрию» поступления возмущающих воздействий ζ в каналы системы.

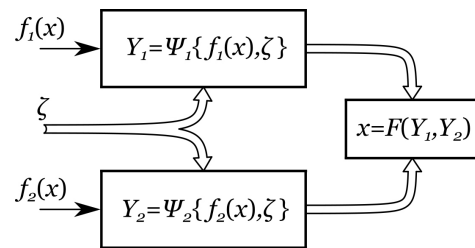


Рис. 1. Структурная модель системы, реализующей принцип двухканальности: $f_1(x)$ – сигнал на входе первого канала; $f_2(x)$ – сигнал на входе второго канала; ζ – возмущающие воздействия; $Y_1 = \Psi_1\{f_1(x), \zeta\}$ – функция преобразования первого измерительного канала; $Y_2 = \Psi_2\{f_2(x), \zeta\}$ – функция преобразования второго измерительного канала; $x = F\{Y_1, Y_2\}$ – результирующая функция преобразования системы

Fig. 1. Structural model of a system that implements the two-channel principle: $f_1(x)$ – signal at the input of the first channel; $f_2(x)$ – signal at the input of the second channel; ζ – disturbing influences; $Y_1 = \Psi_1\{f_1(x), \zeta\}$ – transformation function of the first measuring channel; $Y_2 = \Psi_2\{f_2(x), \zeta\}$ – the conversion function of the second measuring channel; $x = F\{Y_1, Y_2\}$ – resulting system transformation function

Механизм реализации «симметрии» обуславливает сущность оператора $F\{Y_1, Y_2\}$ и позволяет перейти к формализации необходимых и достаточных признаков метода, реализация которых в системе обеспечит ее нечувствительность к возмущающим воздействиям ζ .

1. Теоретические основы структурного метода на базе принципа двухканальности

Методообразующие признаки данного метода могут быть представлены в виде следующих положений.

1. Наличие в структуре преобразователя не менее 2 каналов, «симметричных» относительно возмущающих воздействий ζ_j и «асимметричных» относительно информативной или информативных величин x :

$$Y_1 = \Psi_1\{f_1(x), \zeta_j\},$$

$$Y_n = \Psi_n\{f_n(x), \zeta_j\},$$

$$n \geq 2;$$

$$f_1(x) \neq \dots \neq f_n(x),$$

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

2. Реализуемость алгоритма, получаемого из решения относительно x системы уравнений (1):

$$x = F(Y_1, \dots, Y_n), \quad n \geq 2. \quad (3)$$

3. 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 $\Delta z_3 / z_{30}$ от номинального значения.

Отметим, что во многих публикациях принцип двухканальности трактуется как принцип многоканальности, и его реализация на практике допускает наличие в системах большего числа каналов, нежели два. Поэтому приведенные выше положения метода распространены на более общий случай, когда число каналов определяется условием $n \geq 2$.

2. Реализация структурного метода

Для иллюстрации работы структурного метода, основанного на принципе двухканальности, можно выбрать любой пример из множества доступных, поскольку в настоящее время метод распространен на весь класс параметрических измерительных преобразователей [15]. Принципиальной особенностью и недостатком любых параметрических измерительных преобразователей, как измерительных мостов, так и делителей напряжения, является необходимость обеспечения стабильных и высокоточных параметров источников питания. Но это справедливо до тех пор, пока не заработал принцип двухканальности. Рассмотрим два примера, которые при всем их видимом различии объединяет общий способ измерения [21].

На рис. 2 показан двухканальный неравновесный параллельно-симметричный мост с двумя рабочими плечами. Его особенность 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 преобразователя 5, включенного последовательно с источником питания 6. Суммирование названных токов i_1 и i_2 , протекающих в плечах моста, обеспечивается ра-

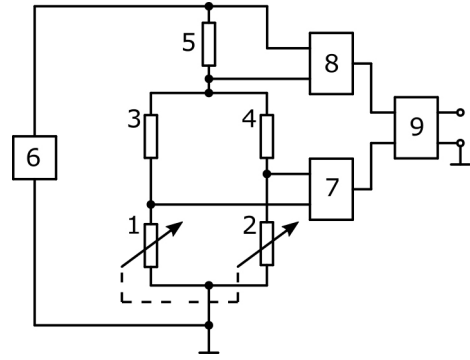


Рис. 2. Инвариантный измерительный мост В.Н. Нестерова: 1, 2 – дифференциально включенные первичные преобразователи; 3, 4, 5 – преобразователи с постоянными параметрами; 6 – источник питания; 7, 8 – дифференциальные усилители напряжения; 9 – устройство деления
Fig. 2. Invariant measuring bridge of V.N. Nesterov: 1, 2 – differentially connected primary converters; 3, 4, 5 – converters with constant parameters; 6 – power supply; 7, 8 – differential voltage amplifiers; 9 – dividing device

венством параметров преобразователей 3, 4 и 5: $z_3 = z_4 = z_5 = z$. Тогда в соответствии с первым законом Кирхгофа на преобразователе 5 получаем: $z i = z(i_1 + i_2)$, где i – ток в диагонали питания.

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

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

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

где

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

– симметричная 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:

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

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

Выполнение условий $k_1 = k_2$, $R_{11} z_2 = z_0$, $z_3 = z_4 = z_5 = z$ позволяет получить следующую функцию преобразования:

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

Она линейна и абсолютно инвариантна относительно нестабильности ЭДС источника питания E . Последнее подтверждается тождественным равенством нулю критерия

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

для функции преобразования (8).

Измерительный преобразователь, показанный на рис. 3, так же, как и в предшествующем случае, реализует способ построения инвариантной измерительной цепи [15]. Устройство по существу 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:

$$U_1 = -k_1 E \frac{(z - \Delta z)}{2z}; \quad (10)$$

$$U_2 = k_2 E \frac{(z + \Delta z)}{2z}, \quad (11)$$

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 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).

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

$$F = \frac{(U_2 + U_1)}{(U_2 - U_1)} = \frac{\Delta z}{z}. \quad (12)$$

Как видно из выражения (12), функция преобразователя устройства абсолютно инвариантна

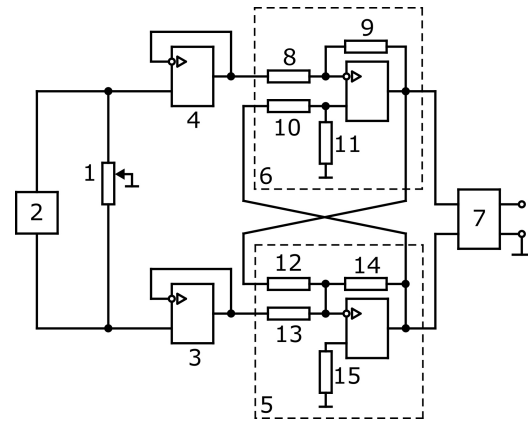


Рис. 3. Двухканальный делитель напряжения с перекрестными обратными связями: 1 – дифференциальный первичный преобразователь; 2 – источник питания; 3 и 4 – повторители напряжения; 5 – инвертирующий сумматор напряжения; 6 – дифференциальный усилитель напряжения; 7 – устройство деления; 8...15 – резисторы

Fig. 3. Two-channel voltage divider with cross-feedback: 1 – differential primary converter; 2 – power supply; 3 and 4 – voltage repeaters; 5 – inverting voltage adder; 6 – differential voltage amplifier; 7 – dividing device; 8...15 – resistors

относительно нестабильности параметров источника питания 2, что подтверждается выполнением критерия (4):

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

Следует отметить еще один положительный результат, который достигнут в устройствах благодаря использованию второго канала. Этот результат заключается в линеаризации результирующей функции преобразования системы при исходной нелинейности любого из каналов. Это можно было увидеть на примере двухканального измерительного моста, показанного на рис. 2. А учитывая, что использование параметрических измерительных преобразователей в значительной степени ограничивается нелинейностью их функций преобразования [22], отдельного рассмотрения требует способ их линеаризации, также основанный на использовании принципа двухканальности.

3. Линеаризация функций преобразования на основе принципа двухканальности

Способ основан на организации в структуре преобразователя дополнительного измерительного канала, «симметричного» с основным относительно нелинейной составляющей исходной функции преобразования и «асимметричного» относительно информативной измеряемой величины, и дальнейшего алгебраического преобразования

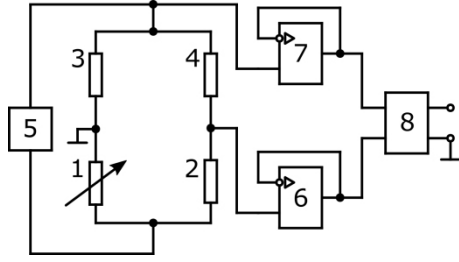


Рис. 4. Двухканальный неравновесный измерительный мост с одним рабочим плечом: 1 – первичный преобразователь; 2, 3, 4 – преобразователи с постоянными параметрами; 5 – источник питания; 6, 7 – повторители напряжения; 8 – устройство деления

Fig. 4. Two-channel non-equilibrium measuring bridge with one working arm: 1 – primary converter; 2, 3, 4 – converters with constant parameters; 5 – power supply; 6, 7 – voltage repeaters; 8 – dividing device

полученных в результате сигналов [23]. Модель, представленная на рис. 1, хорошо иллюстрирует сущность способа, если под возмущающим воздействием ζ понимать также и нелинейную компоненту, симметрично отраженную в функциях преобразования измерительных каналов. Тогда, обозначив нелинейную составляющую Ω , модель (1) для двухканальной системы несколько модифицируем и формальные признаки метода представим следующим образом:

$$Y_1 = \Psi_1 \{ f_1(x), \zeta, \Omega \}; \quad (13)$$

$$Y_2 = \Psi_2 \{ f_2(x), \zeta, \Omega \},$$

$$f_1(x) \neq f_2(x), \quad (14)$$

где Y_1, Y_2 – функции преобразования измерительных каналов; $f_1(x), f_2(x)$ – функции, обеспечивающие асимметрию поступления информативной величины x на входы соответствующих измерительных каналов; Ω – нелинейная составляющая, входящая в Ψ_1 и Ψ_2 .

В соответствии с (3) получаем линейную функцию преобразования:

$$x = F(Y_1, Y_2). \quad (15)$$

Критерием эффективности линейризации двухканального измерительного преобразователя в соответствии с (4) служит строгое выполнение тождества:

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial Y_1} \frac{\partial Y_1}{\partial \Omega} \Delta \Omega + \frac{\partial F}{\partial Y_2} \frac{\partial Y_2}{\partial \Omega} \Delta \Omega \equiv 0. \quad (16)$$

4. Пример линейризации параметрического преобразователя

На рис. 4 представлен двухканальный неравновесный измерительный мост с одним рабочим плечом.

Сигнал первого канала, снимаемый с измерительной диагонали неравновесного моста, описывается функцией преобразования с существенной нелинейностью относительно информативного параметра Δz первичного преобразователя 1:

$$U_1 = \frac{E(z_1 z_4 - z_2 z_3 + z_4 \Delta z)}{(z_2 + z_4)[z_3 + (z_1 + \Delta z)]}, \quad (17)$$

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.

Сигнал со второго канала:

$$U_2 = \frac{E z_3}{[z_3 + (z_1 + \Delta z)]}. \quad (18)$$

Как видно из (17) и (18), нелинейная компонента, симметрично представленная в обоих измерительных каналах, имеет вид

$$\Omega = 1/[z_3 + (z_1 + \Delta z)].$$

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

$$U_1^* = k_1 U_1; \quad (19)$$

$$U_2^* = k_2 U_2,$$

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

Соответственно, результирующая функция преобразования устройства:

$$F = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{k_1 (z_1 z_4 - z_2 z_3 + z_4 \Delta z)}{k_2 z_3 (z_2 + z_4)}. \quad (20)$$

При выполнении условий $k_1 = k_2$ и $z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z$ функция преобразования (20) приобретает вид

$$F = \Delta z / (2z). \quad (21)$$

Она абсолютно инвариантна относительно неустойчивости ЭДС источника питания E , поскольку для (20) выполняется критерий

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

и линейна во всем диапазоне изменения информативного параметра Δz . Последнее подтверждается строгим выполнением критерия (16):

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

Данный способ линейризации распространен на весь класс параметрических измерительных пре-

образователей в составе неравновесных измерительных мостов и делителей напряжения.

Тем не менее, подводя итогу этому большому разделу, необходимо сделать следующий неутешительный вывод: при всех достигнутых положительных результатах рассмотренный метод не является универсальным, поскольку источником погрешностей преобразователей и систем является нестабильность параметров всех входящих в них элементов. Обеспечить «симметрию» влияния всех элементов на каналы преобразователей не всегда представляется возможным. Поэтому целесообразно рассмотреть возможности компенсации внешних возмущений на элементы, установленные в разных каналах преобразователей.

5. Теоретические основы технологического метода, реализующего принцип двухканальности

Методообразующие признаки технологического метода [14], получившего название вследствие особенностей мероприятий, необходимых для его осуществления на практике, могут быть представлены следующими положениями.

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:

$$\left\{ \frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} - \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}} \right\} \rightarrow 0, \quad r \neq l; \quad r, l \in q, \quad (22)$$

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

$$\Delta F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q \frac{\partial F}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial k_{ij}(\zeta_j)} \Delta k_{ij}(\zeta_j) \rightarrow 0, \quad (23)$$

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

В предельном случае, если выражения (22) превратятся в тождество, критерий (23) достигает нулевого экстремума, и можно говорить о дости-

жении абсолютной инвариантности системы относительно возмущающих воздействий. Но такой случай является идеальным и на практике невозможен. Поэтому принципиальной в данном случае задачей является методическая задача поиска парных элементов и соответствующих им технологических мероприятий, приводящих к максимально близкому выполнению критерия (23). Анализируя изложенное, можно сделать вывод, что решаемая задача распадается на две. Первая из них заключается в выявлении признаков, отражающих сущность технологического метода применительно к каждому конкретному случаю. Вторая задача состоит в реализации методики, позволяющей эти признаки эффективно применить.

Методика выявления технологического «ноу-хау» базируется на использовании критерия (23). Поскольку левая часть последнего представляет собой выражение погрешностей, возникающих вследствие действия влияющих факторов на входящие в систему элементы, то, приравняв ее к нулю и осуществив необходимые преобразования, представляется возможным в аналитическом виде

$$\frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} = \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}}, \quad r \neq l; \quad r, l \in q \quad (24)$$

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.

Отметим, что представленные положения структурного и технологического методов основаны на принципе двухканальности, но они могут быть распространены на более широкие классы систем в расчете на многоканальность передачи возмущающих воздействий в систему, где количество каналов отвечает условию $q \geq 2$.

6. Реализация технологического метода

Рассмотрим работу метода на примере полумостового двухканального измерительного преобразователя (рис. 5) [24].

На выходах дифференциальных усилителей 5 и 6, благодаря их высокому входному сопротивлению сигналы определяются выражениями:

$$U_1 = \frac{k_1 E [(z_1 + \Delta z) + z_3]}{[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3]}; \quad (25)$$

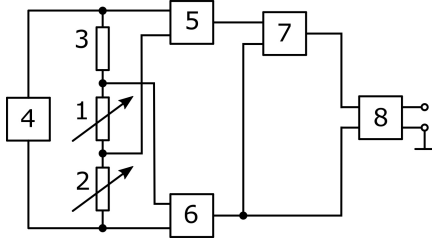


Рис. 5. Полумостовой инвариантный измерительный преобразователь: 1, 2 – первичные преобразователи резистивного типа; 3 – преобразователь, выполненный в виде резистора; 4 – источник питания; 5, 6, 7 – дифференциальные усилители; 8 – блок деления

Fig. 5. Half-bridge invariant measuring transducer: 1, 2 – primary transducers of resistive type; 3 – a converter made in the form of a resistor; 4 – power supply; 5, 6, 7 – differential amplifiers; 8 – division block

$$U_2 = \frac{k_2 E [(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z)]}{[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3]}, \quad (26)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению, соответственно, дифференциальных усилителей 5 и 6; $(z_1 + \Delta z)$ и $(z_2 - \Delta z)$ – значения параметров преобразователей 1 и 2 (z_1 и z_2 – начальные значения параметров, а Δz – информативное приращение параметров); z_3 – значение параметра преобразователя 3; E – ЭДС источника питания 4.

Сигналы (25) и (26) подаются на прямой и инвертирующий входы дифференциального усилителя 7, на выходе которого при выполнении условия $k_1 = k_2 = k$ получаем разностный сигнал:

$$U_1 - U_2 = \frac{k E [z_3 - (z_2 - \Delta z)]}{[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3]}. \quad (27)$$

Далее сигналы (26) и (27) поступают в блок деления 8. При выполнении условия: $z_1 = z_2 = z_3 = z$, получаем:

$$F = \frac{U_1 - U_2}{U_2} = \frac{\Delta z}{2z}. \quad (28)$$

Функция преобразования (28) линейна во всем диапазоне изменения информативного Δz и абсолютно инвариантна относительно нестабильности ЭДС источника питания. Что подтверждается следующими критериями:

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

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial Y_1} \frac{\partial Y_1}{\partial \Omega} \Delta \Omega + \frac{\partial F}{\partial Y_2} \frac{\partial Y_2}{\partial \Omega} \Delta \Omega \equiv 0,$$

где нелинейная компонента

$$\Omega = \frac{1}{[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3]}.$$

Таким образом, в этом случае решены две задачи: обеспечена абсолютная инвариантность относительно нестабильности ЭДС источника питания и линеаризована исходная функция преобразования.

Однако нестабильность параметров остальных элементов является источником возникновения дополнительных погрешностей.

В рамках рассматриваемой методики выявляем в составе измерительного преобразователя группы технологически однотипных элементов: преобразователи 1–3 и дифференциальные усилители 5 и 6.

Руководствуясь критерием (23), запишем соответствующим образом структурированное выражение погрешности от действия влияющих факторов на указанные группы элементов:

$$\begin{aligned} \Delta F = & \frac{[(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}]}{[(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0]} \left\{ \left(\frac{\Delta k_1}{k_0} - \frac{\Delta k_2}{k_0} \right) + \right. \\ & \frac{(z_1 + \Delta z)_0 (z_2 - \Delta z)_0}{[(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{30}] [(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}]} \times \\ & \times \left[\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right] + \\ & + (z_2 - \Delta z)_0 z_{30} [2(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{30}] \times \\ & \times \left[\frac{\Delta z_3}{z_{30}} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right] / \\ & / \left\{ [(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{30}] [(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}] \times \right. \\ & \times [(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0] \left. \right\} + (z_1 + \Delta z)_0 z_{30} \times \\ & \times \left[\frac{\Delta z_3}{z_{30}} - \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} \right] / \\ & / \left\{ [(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{30}] \times \right. \\ & \times [(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0] \left. \right\} \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (29)$$

где

$$\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0}, \quad \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0}, \\ \frac{\Delta z_3}{z_{30}}, \quad \frac{\Delta k_1}{k_0}, \quad \frac{\Delta k_2}{k_0}$$

– относительные изменения под действием влияющих факторов, соответственно, параметров элементов 1, 2, 3 и коэффициентов передачи дифференциальных усилителей 5 и 6.

Выражение погрешности (29) будет стремиться к нулю при «дифференциально-симметричном»

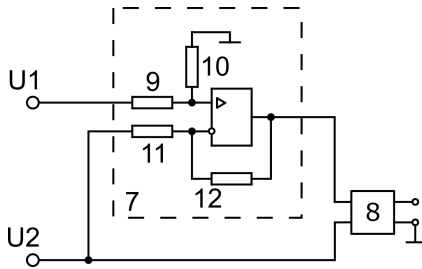


Рис. 6. Дифференциальный усилитель в составе измерительного преобразователя: 9–12 – однотипные резисторы
 Fig. 6. Differential amplifier as part of the measuring transducer: 9–12 – resistors of the same type

влиянии дестабилизирующих факторов на параметры соответствующих групп элементов:

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

$$\left\{ \frac{\Delta z_3}{z_{30}} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right\} \rightarrow 0; \quad \left\{ \frac{\Delta z_3}{z_{30}} - \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} \right\} \rightarrow 0. \quad (30)$$

Из (30) получаем условия компенсации влияния дестабилизирующих факторов на соответствующие группы элементов преобразователя, представляемые аналитически в следующем виде:

$$\frac{\Delta k_1}{k_0} = \frac{\Delta k_2}{k_0}; \quad \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} = \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} = \frac{\Delta z_3}{z_{30}}. \quad (31)$$

Анализ условий (31) позволяет определить комплекс технологических мероприятий, касающихся указанных групп элементов рассмотренного преобразователя, которые обеспечат компенсацию действующих на них возмущающих факторов с точностью до ε :

- 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 др.;
- элементы, составляющие группу, должны находиться в идентичных условиях относительно любых возмущающих воздействий;
- активные элементы, составляющие группу, должны быть одной марки, желательно из одной партии и, при возможности, иметь общий источник питания.

Выполнение перечисленных требований позволит максимально приблизиться к выполнению критерия (23) и, соответственно, обеспечит уменьшение дополнительных погрешностей, модель которых представлена выражением (29).

В выражении (29) не учтён вклад дифференциального усилителя 7. После аналогичных преобразований, учитывающих коэффициент передачи

k_3 дифференциального усилителя 7, можем (31) дополнить условием

$$\frac{\Delta k_1}{k_0} = \frac{\Delta k_2}{k_0} = \frac{\Delta k_3}{k_0}.$$

Однако коэффициенты передачи дифференциальных усилителей, учитывая их высокое стремящееся к бесконечности входное сопротивление, определяются параметрами навесных элементов. Соответственно, их нестабильность зависит от нестабильности параметров навесных элементов.

Раскрывая техническое содержание дифференциального усилителя 7, обнаруживаем группу однотипных резисторов 9–12, которые и определяют его функцию преобразования (рис. 6).

Напряжение на выходе дифференциального усилителя 7 определяется выражением

$$U_3 = U_1 \frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}} \left(1 + \frac{R_{12}}{R_{11}} \right) - U_2 \frac{R_{12}}{R_{11}}, \quad (32)$$

где $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$ – сопротивления резисторов 9–12 соответственно.

Очевидно, что при выполнении условия $R_9 = R_{10} = R_{11} = R_{12}$ выражение (32) принимает вид $U_3 = U_1 - U_2$,

что и требуется в соответствии с алгоритмом работы схемы.

Из (32) видно, что нестабильность данного дифференциального усилителя определяется нестабильностью сопротивлений $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$. Выражение погрешности, возникающей вследствие нестабильности указанных сопротивлений, имеет следующий вид:

$$\Delta U_3 = \frac{\partial U_3}{\partial R_9} \Delta R_9 + \frac{\partial U_3}{\partial R_{10}} \Delta R_{10} + \frac{\partial U_3}{\partial R_{11}} \Delta R_{11} +$$

$$+ \frac{\partial U_3}{\partial R_9} \Delta R_9 + \frac{\partial U_3}{\partial R_{12}} \Delta R_{12} = U_1 \frac{R_9 R_{10}}{(R_9 + R_{10})^2} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{R_{12}}{R_{11}} \right) \left[\frac{\Delta R_{10}}{R_{10}} - \frac{\Delta R_9}{R_9} \right] +$$

$$+ \frac{R_{12}}{R_{11}} \left(U_1 \frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}} - U_2 \right) \left[\frac{\Delta R_{12}}{R_{12}} - \frac{\Delta R_{11}}{R_{11}} \right]. \quad (33)$$

В соответствии с критерием (23) из выражения (33) выявляем необходимость «дифференциально-симметричного» влияния дестабилизирующих факторов на параметры соответствующих групп резисторов R_9, R_{10} и R_{11}, R_{12} :

$$\left\{ \frac{\Delta R_{10}}{R_{10}} - \frac{\Delta R_9}{R_9} \right\} \rightarrow 0; \quad \left\{ \frac{\Delta R_{12}}{R_{12}} - \frac{\Delta R_{11}}{R_{11}} \right\} \rightarrow 0. \quad (34)$$

Соответственно, из (34) получаем условия компенсации воздействия дестабилизирующих факторов на дифференциальный усилитель:

$$\frac{\Delta R_{10}}{R_{10}} = \frac{\Delta R_9}{R_9}; \quad \frac{\Delta R_{12}}{R_{12}} = \frac{\Delta R_{11}}{R_{11}}. \quad (35)$$

Как и было отмечено выше, условия (35) реализуются за счет технологических мероприятий:

– резисторы R_9 , R_{10} и R_{11} , R_{12} , составляющие парные группы, должны быть технологически идентичны, выполнены из одного и того же материала, изготовлены на основе идентичных комплектов, взяты из одной партии и др.;

– резисторы R_9 , R_{10} и R_{11} , R_{12} , составляющие парные группы, должны находиться в идентичных условиях относительно любых возмущающих воздействий.

Очевидно, такие же требования справедливы и для дифференциальных усилителей 5 и 6.

Заключение

Как видно из приведенного материала, сформулированный уже достаточно давно принцип двухканальности (многоканальности) не исчерпал заложенный в него потенциал развития и в настоящее время. Это объясняется тем, что наличие двух или более каналов в системах является необходимым, но недостаточным условием обеспечения их инвариантности относительно тех или иных возмущающих факторов. Развитие принципа двухканальности до методического уровня требует обоснования и нахождения необходимых и достаточных условий, реализация которых позволит обеспечить инвариантность (квазиинвариантность) систем относительно соответствующих возмущающих воздействий. При этом, как показано на примере рассмотренных методов, универсальных решений нет. Не всегда и не во всех случаях удается решить вопросы физической реализуемо-

сти совершенно правильно сформулированных условий инвариантности. Иногда этому препятствует жесткость исполнения какого-либо условия, как, например, необходимость «симметричной» передачи возмущающего воздействия от общего источника в оба канала системы, что характерно для рассмотренного структурного метода. В технологическом методе не требуются компоненты, задействованные на оба канала, и «симметрия» влияния обеспечивается совершенно по-другому. Однако и в том, и другом случае мы компенсируем влияние дестабилизирующих факторов, используя принцип двухканальности с учетом возможностей его физической реализуемости. По всей видимости, потенциальные возможности принципа двухканальности действительно далеко не раскрыты. Появление новых задач, сопровождающихся особенными эксплуатационными условиями, будет раскрывать этот потенциал снова и снова. Так, например, как отмечено в [14], технологический метод сохранит свою эффективность и позволит компенсировать возмущающие воздействия неизвестной заранее физической природы. А это глубокий космос и т. д. Способ линеаризации принципиально нелинейных функций преобразования параметрических преобразователей, также рассмотренный в этой работе, – это еще одно реальное подтверждение потенциала принципа двухканальности.

В завершение отметим, что применение принципа двухканальности не должно осуществляться бездумно вслепую. Оно должно сопровождаться корректным метрологическим анализом, подтверждающим правильность и эффективность применяемых мероприятий. В противном случае результат применения метода может не оправдать ожиданий и привести к противоположному результату.

Список литературы

1. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б.Н. Петров [и др.]. М.: Наука, 1976. 244 с.
2. Щипанов Г.В. Теория и методы построения автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1. С. 4–37.
3. Щипанов Георгий Владимирович. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. URL: <https://www.ipu.ru/node/12143> (дата обращения: 28.09.2020).
4. Кулебакин В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах // ДАН СССР. 1948. Т. 60, № 2. С. 231–234.
5. Петров Б.Н. Принцип инвариантности и условия его применения при расчёте линейных и нелинейных систем // Теория непрерывных систем: тр. 1 междунар. конф. ИФАК. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 259–275.
6. 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.
7. Хрусталев М.М. Необходимые и достаточные условия слабой инвариантности // Автоматика и телемеханика. 1968. № 4. С. 17–22.

8. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
9. Ивахненко А.Г. Связь теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем // Автоматика. 1960. № 5. С. 35–40.
10. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М.: Издательство стандартов, 1972. 199 с.
11. 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. URL: <https://imuk.pnzgu.ru/IMUK14216>.
12. Свистунов Б.Л. Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 2 (20). С. 94–100. URL: <https://imuk.pnzgu.ru/imuk13217>.
13. Чернецов М.В., Чураков П.П. Инвариантное преобразование в измерительных системах с параметрическими датчиками // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 1 (23). С. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2018-1-2>.
14. Nesterov V.N., Li A.R. Application of two-channel principle in measuring devices to compensate for disturbing influences of unknown physical nature // *Pribory i metody izmerenij*. 2020. Vol. 11, No. 3. С. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-3-228-235>.
15. Нестеров В.Н. Новый класс инвариантных измерительных преобразователей: методы построения и реализация для приборов и систем специального назначения // Информационные, измерительные и управляющие системы: науч.-техн. сб. Самарского отделения Поволжского центра Метрологической академии России. Самара, 2007. Вып. 3. С. 18–37.
16. Новиков В.Н. Инвариантные преобразователи перемещений с переменной структурой измерительных цепей // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 48–51.
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. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_4_1414_1422.pdf.
18. Keil S. Technology and Practical Use of Strain Gages: With Particular Consideration of Stress Analysis Using Strain. Dual-Channel Principle. Berlin: Wiley, 2017. P. 197–200.
19. Нестеров В.Н., Андреев И.П. Повышение точности турбинных преобразователей расхода с помощью метода обобщенных влияющих величин // Измерительная техника. 2017. № 4. С. 22–26.
20. Нестеров В.Н. Моделирование инвариантных и квазиинвариантных систем на основе принципа многоканальности // Прикладная физика и математика. 2020. № 5. С. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.25791/pfm.05.2020.1178>.
21. Нестеров В.Н. Способ построения инвариантной измерительной цепи и инвариантный измерительный мост: патент РФ № 1795375, МКИ G 01 R 17/10; заявл. 24.05.1990; опубл. 15.02.1993; бюл. № 6.
22. Электрические измерения неэлектрических величин / под ред. П.В. Новицкого. Л.: Энергия, 1975. 576 с.
23. Нестеров В.Н. Двухканальные параметрические измерительные преобразователи с линейными функциями преобразования // Измерительная техника. 1999. № 5. С. 39–45.
24. Нестеров В.Н., Мухин В.М. Измерительный преобразователь: патент РФ № 2297638, МКИ G 01 R 17/10; заявл. 26.12.2005; опубл. 20.04.2007; бюл. № 11.

References

1. Petrov B.N. et al. *The Principle of Invariance in Measuring Technology*. Moscow: Nauka, 1976, 244 p. (In Russ.)
2. Schipanov G.V. Theory and methods of constructing automatic regulators. *Avtomatika i telemekhanika*, 1939, no. 1, pp. 4–37. (In Russ.)
3. Schipanov Georgij Vladimirovich. Institute for Management Problems V.A. Trapeznikov RAS. URL: <https://www.ipu.ru/node/12143> (accessed 28.09.2020). (In Russ.)
4. Kulebakin V.S. On the applicability of the principle of absolute invariance in physical real systems. *DAN SSSR*, 1948, vol. 60, no. 2, pp. 231–234. (In Russ.)
5. Petrov B.N. The principle of invariance and the conditions for its application in the calculation of linear and nonlinear systems. *Teoriya nepreryvnyh sistem: tr. 1 mezhdunar. konf. IFAK. T. 1*, Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961, pp. 259–275. (In Russ.)
6. Petrov B.N., Kuhtenko A.I. Structures of absolutely invariant systems and conditions for their physical realizability. *Teoriya invariantnosti v sistemah avtomaticheskogo upravlenija: tr. vsesojuz. soveshanija*, Moscow: Nauka, 1964, pp. 24–28. (In Russ.)
7. Hrustalev M.M. Necessary and sufficient conditions for weak invariance. *Avtomatika i telemekhanika*, 1968, no. 4, pp. 17–22. (In Russ.)
8. *Automatic Control Theory Handbook*. Ed. by A.A. Krasovskij. Moscow: Nauka, 1987, 712 p. (In Russ.)
9. Ivahnenko A.G. Connection of the theory of invariance with the theory of stability of measuring systems. *Avtomatika*, 1960, no. 5, pp. 35–40. (In Russ.)
10. Zemel'man M.A. *Automatic Correction of Measuring Device Errors*. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1972, 199 p. (In Russ.)
11. Ashanin V.N., Larkin S.E., Regeda O.N. Correction of errors of measuring circuits of parametric sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2016, no. 2 (16), pp. 103–109. URL: <https://imuk.pnzgu.ru/IMUK14216>. (In Russ.)
12. Svistunov B.L. Transmitters for parametric sensors using analytical redundancy. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2017, no. 2 (20), pp. 94–100. URL: <https://imuk.pnzgu.ru/imuk13217>. (In Russ.)
13. Chernetsov M.V., Churakov P.P. Invariant transformation in measuring systems with parametric sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2018, no. 1 (23), pp. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2018-1-2>. (In Russ.)
14. Nesterov V.N., Li A.R. Application of two-channel principle in measuring devices to compensate for disturbing influences of unknown physical nature. *Pribory i metody izmerenij*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-3-228-235>.

15. Nesterov V.N. A new class of invariant measuring transducers: construction methods and implementation for special-purpose devices and systems. *Informatsionnye, izmeritel'nye i upravljajushchie sistemy: nauch.-tehn. sb. Samarskogo otdelenija Povolzhskogo tsentra Metrologicheskoy akademii Rossii*, Samara, 2007, no. 3, pp. 18–37. (In Russ.)
16. Novikov V.N. Invariant displacement transducers with variable structure of measuring circuits. *Datchiki i sistemy*, 2012, no. 9, pp. 48–51. (In Russ.)
17. Nesterov V.N., Li A.R. Theory and practice of constructing invariant measuring transducers and systems based on the two-channel principle. *Izvestija Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk*, 2016, vol. 18, no. 4 (7), pp. 1414–1422. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_4_1414_1422.pdf. (In Russ.)
18. Keil S. *Technology and Practical Use of Strain Gages: With Particular Consideration of Stress Analysis Using Strain. Dual-Channel Principle*. Berlin: Wiley, 2017, pp. 197–200.
19. Nesterov V.N., Andreev I.P. Improving the accuracy of turbine flow converters using the method of generalized influence quantities. *Izmeritel'naja tehnika*, 2017, no. 4, pp. 22–26. (In Russ.)
20. Nesterov V.N. Modeling invariant and quasi-invariant systems based on the multichannel principle. *Prikladnaja fizika i matematika*, 2020, no. 5, pp. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.25791/pfim.05.2020.1178>. (In Russ.)
21. Nesterov V.N. Method of constructing an invariant measuring circuit and an invariant measuring bridge. Patent RF, no. 1795375, MKI G 01 R 17/10. (Declared 24.05.1990; publ. 15.02.1993; bul. no. 6.). (In Russ.)
22. *Electrical Measurements of Non-Electrical Quantities*. Ed. by P.V. Novitskij. Leningrad: Energija, 1975, 576 p. (In Russ.)
23. Nesterov V.N. Two-channel parametric transmitters with linear conversion functions. *Izmeritel'naja tehnika*, 1999, no. 5, pp. 39–45. (In Russ.)
24. Nesterov V.N., Muhin V.M. Measuring transducer. Patent RF no. 2297638, MKI G 01 R 17/10. (Declared 26.12.2005; publ. 20.04.2007; bul. no. 11). (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2020, vol. 23, no. 4, pp. 56–67

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.4.56-67

Received 26 November 2020
Accepted 17 December 2020

From the principle of dual-channel to the theory of constructing invariant measuring systems

Vladimir N. Nesterov^{1,2,3}

¹ JSC «Samara Electromechanical Plant»
16, Stepan Razin Street,
Samara, 443099, Russia

² Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

³ Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse,
Samara, 443086, Russia

Abstract – The article presents the theoretical foundations for constructing invariant and quasi-invariant relative to the disturbing influences of measuring systems. A historical reference which shows the emergence, evolution and spread of methods of the theory of invariance from automatic control and regulation systems to information and measuring systems and measurements in general is given. The possibilities of new applications of the formulated by academician B.N. Petrov of the two-channel principle are shown. On its basis, methodological signs of the physical feasibility of structural and technological methods are formulated. Theoretical foundations and the method of linearization of principally nonlinear transformation functions of parametric measuring transducers, which are also based on the principle of two-channel, are given. All theoretical positions are supported by practical examples that extend the capabilities of the considered methods to the entire class of parametric measuring transducers as part of non-equilibrium measuring bridges and voltage dividers.

Keywords – invariance theory, two-channel principle, structural method, technological method, linearization method, disturbing influences, measuring systems, parametric transducers.

Информация об авторе

Нестеров Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, академик Метрологической академии России, заместитель генерального директора по науке – начальник научно-технического центра АО «Самарский электромеханический завод», профессор кафедры теоретических основ радиотехники и связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: проблемные вопросы измерительной техники, искусственного интеллекта и робототехники, теория и практика создания инвариантных систем и преобразователей, оптические измерения.

E-mail: nesterov.ntc@gmail.com

Information about the Author

Vladimir N. Nesterov, Doctor of Technical Sciences, professor, Academician of the Metrological Academy of Russia, Deputy General Director for Science – Head of the Scientific and Technical Center of JSC «Samara Electromechanical Plant», Professor of the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communication, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: problematic issues of measuring technology, artificial intelligence and robotics, theory and practice of creating invariant systems and transducers, optical measurements.

E-mail: nesterov.ntc@gmail.com

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П.

ISBN 978-5-88070-222-0

УДК 621.396.67

ББК 32.845

Современная теория
и практические применения
антенн

Издательство «Радиотехника»
Москва, 2009

Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.