

Структуры абсолютно инвариантных измерительных систем и условия их физической реализуемости

В.Н. Нестеров^{1,2}, А.Р. Ли¹

¹АО «Самарский электромеханический завод», Степана Разина 16, Самара, Россия, 443099

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Представлена теория построения абсолютно инвариантных измерительных систем и преобразователей. Теория развивает принцип двухканальности академика Б.Н. Петрова до необходимых и достаточных условиям физической реализуемости абсолютной инвариантности рассматриваемых систем относительно возмущающих воздействий.

1. Введение

Основные идеи создания абсолютно инвариантных относительно возмущающих воздействий систем и систем с инвариантностью до ε , а также условия их физической реализуемости первоначально были высказаны и нашли применение в теории автоматического управления и регулирования [1-4]. Однако через некоторое время появились публикации о связи теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем [5,6]. За прошедшие годы данное направление получило дальнейшее развитие [7-14]. Это подтверждает актуальность темы и, к сожалению, не дает возможности дать ссылки на все известные в этой области работы.

Особенно продуктивным для решения проблемы компенсации возмущающих воздействий на измерительные устройства оказался принцип двухканальности, сформулированный академиком Б.Н. Петровым [6]. Анализ подходов, использованных в процессе построения измерительных преобразователей на основе принципа двухканальности, позволяет рассматривать их как системы, к которым применимы методы синтеза и анализа, разработанные в теории и практике информационно-измерительных систем. Первые публикации автора, касающиеся двухканальных параметрических преобразователей, показали, что мы имеем дело с классической реализацией принципа двухканальности, которые еще не оформились в понимание о возможности его распространения на класс названных преобразователей [15,16]. Более двадцати патентов на изобретения, полученные в дальнейшем, на многие из которых имеются ссылки в фундаментальной работе [12], позволили говорить о возможностях создания класса двухканальных параметрических измерительных преобразователей, основанных на использовании принципа двухканальности. Учитывая методическую общность полученных технических решений, сформулированы методобразующие признаки структурного [12,13] или аналитического [14] метода базирующегося на принципе двухканальности (многоканальности). Данные методобразующий

признаки, которые приводятся далее, по существу являются необходимыми и достаточными условиями, выполнение которых обуславливает физическую реализуемость упомянутого метода.

2. Методообразующие признаки структурного метода синтеза инвариантных преобразователей

В соответствии с основными положениями структурного метода [13], для его физической реализации необходимо выполнение следующих методических признаков.

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

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= \Psi_1 \{f_1(x), \zeta_j\}; \\ &\dots\dots\dots \\ Y_n &= \Psi_n \{f_n(x), \zeta_j\}; \\ f_1(x) &\neq \dots \neq f_n(x), \end{aligned} \right\} (n \geq 2), \tag{1}$$

$$\tag{2}$$

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

$$x = F(Y_1, \dots, Y_n). \tag{3}$$

3. Выполнение критерия:

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

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

Самый простой вариант системы, построенной на основе предложенного метода, реализуется в двухканальной структуре, то есть при $n = 2$.

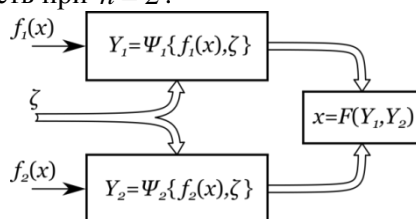


Рисунок 1. Двухканальная структура инвариантной системы.

В структуре, показанной на рисунке 1, очевидна «симметрия» каналов относительно влияющих факторов ζ и их «асимметрия» относительно измеряемой информативной величины x . Как показано в многочисленных технических решениях [17], если сформированы два измерительных канала, реализующие принцип «симметрии» относительно, например, источника питания, то действие любых факторов, вызывающих его нестабильность, может быть компенсировано. Это имеет огромное значение, так как весь класс параметрических измерительных преобразователей требует наличия прецизионных источников питания, а любая нестабильность питания немедленно скажется на точности измерения [18].

Для иллюстрации работы метода рассмотрим конкретный пример его реализации, полностью подпадающий под структуру, показанную на рисунке 1.

3. Структура двухканального неравновесного измерительного моста Нестерова В.Н.

Конфигурация неравновесного измерительного моста, показанного на рисунке 2, действительно полностью соответствует двухканальной структуре на рисунке 1. Можно было бы привести и другой пример из множества доступных. Однако это одно из первых технических решений, по которому был получен патент на способ построения инвариантной измерительной цепи [16], и которое дает наглядное сравнение с классическим неравновешенным мостом Уитстона.

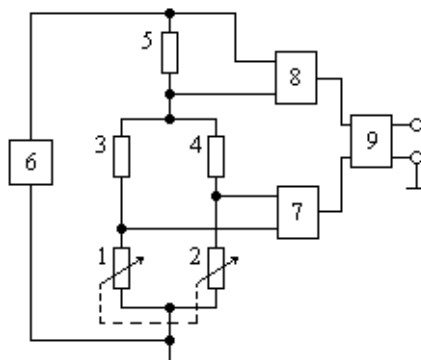


Рисунок 2. Инвариантный измерительный мост Нестерова В.Н.

Особенностью данного устройства является то, что напряжение, пропорциональное разности токов в первичных преобразователях 1 и 2, снимается с измерительной диагонали моста, образованной 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 равенством параметров преобразователей 3, 4 и 5: $z_3 = z_4 = z_5 = z$. В соответствии с первым законом Кирхгофа на преобразователе 5 получаем напряжение: $z \cdot i = z \cdot (i_1 + i_2)$, где i – ток в диагонали питания. Измерительные усилители 7 и 8, обладая высоким входным сопротивлением, обеспечивают развязку каналов преобразования от схемы первичного преобразования.

Таким образом, оба канала моста симметричны относительно источника питания 6 и асимметричны относительно информативных приращений параметров первичных преобразователей 1 и 2. Это соответствует первому методобразующему признаку в соответствии с условиями (1) и (2) в функциях преобразования измерительных каналов:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Тождественное равенство нулю критерия (9) подтверждает абсолютную инвариантность полученной структуры преобразователя относительно нестабильности ЭДС источника питания. Кроме того, как видно из (8), функция преобразования данного измерительного преобразователя линейна во всем диапазоне преобразования. Последнее объясняется тем, что нелинейная составляющая функции преобразования прототипа вошла в качестве симметричной компоненты в функции преобразования синтезированных измерительных каналов и была компенсирована. Последнее подтверждает дополнительные возможности метода по линеаризации функций преобразования параметрических измерительных преобразователей. Что подтверждается на всем классе параметрических преобразователей в составе неравновесных измерительных мостов и делителей напряжения [17].

4. Выводы

Подводя итоги можно сделать вывод, что использованный для создания представленного метода принцип двухканальности является весьма продуктивным. На его основе построен целый класс двухканальных параметрических измерительных преобразователей, свободных от недостатков, свойственных прототипам, а именно, нелинейности функций преобразования и чувствительности к нестабильности питания. В основе представленного класса лежит двухканальная структура, представленная на рисунке 1. Однако анализ возможностей метода, положения которого изложены в разделе 2, позволяет сделать вывод о том, что его возможности значительно превосходят достигнутое. И вектор развития направлен в сторону создания более сложных структур, нежели показано на рисунке 2, о чем напрямую свидетельствует первый методический признак в разделе 2. При этом в качестве факторов, повышающих качество вновь создаваемых систем, могут рассматриваться не только возможности компенсации действия различных внешних и внутренних возмущений, но и возможности повышения информативности за счет создания нескольких взаимoinвариантных выходных сигналов.

5. Литература

- [1] Кулебакин, В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах / В.С. Кулебакин // ДАН СССР. – 1948. – Т. 60, № 2. – С. 231-234.
- [2] Петров, Б.Н. Принцип инвариантности и условия его применения при расчёте линейных и нелинейных систем / Б.Н. Петров // Теория непрерывных систем: Труды 1 междунар. конгр. ИФАК. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – Т. 1. – С. 259-275.

- [3] Петров, Б.Н. Структуры абсолютно инвариантных систем и условия их физической реализуемости / Б.Н. Петров, А.И. Кухтенко // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Всесоюз. совещания. – М.: Наука, 1964. – С. 24-28.
- [4] Хрусталева, М.М. Необходимые и достаточные условия слабой инвариантности / М.М. Хрусталева // Автоматика и телемеханика. – 1968. – № 4. – С. 17-22.
- [5] Ивахненко, А.Г. Связь теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем / А.Г. Ивахненко // Автоматика. – 1960. – № . – С. 35-40.
- [6] Петров, Б.Н. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б.Н. Петров, В.А. Викторова, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – М.: Наука, 1976. – 244 с.
- [7] Чехонадский, Н.А. Использование явления компенсации погрешностей для повышения точности измерительных информационных систем / Н.А. Чехонадский // Измерительная техника. – 1963. – № 1. – С. 3-6.
- [8] Земельман, М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств / М.А. Земельман. – М. Издательство стандартов, 1972. – 199 с.
- [9] Nesterov, V.N. Invariant parametric transducers with linear conversion functions / V.N. Nesterov // Measurement Techniques. – 1993. – Vol. 36(3). – P. 329-334.
- [10] Шакурский, В.К. Синтез инвариантных преобразователей методом контрольного значения / В.К. Шакурский // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 3 – С. 42-49.
- [11] Nesterov, V.N. Double-channel parametric transducers with linear conversion functions / V.N. Nesterov // Measurement Techniques. – 1999. – Vol. 42(5). – P. 464-474.
- [12] Nesterov, V.N. Structural and technological methods in designing invariant measurement sensors / V.N. Nesterov // Measurement Techniques. – 2007. – Vol. 50(2). – P.108-114.
- [13] Нестеров, В.Н. Теория и практика построения инвариантных измерительных преобразователей и систем на основе принципа двухканальности / В.Н. Нестеров, А.Р. Ли // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 4(7). – С. 1414-1422.
- [14] Свистунов, Б.Л. Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности / Б.Л. Свистунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – Т. 2, № 20. – С. 94-100.
- [15] Нестеров, В.Н. Авт. св. 1444618 СССР, МПК G 01 B 7/00. Устройство для измерения перемещений В.Н. Нестерова. – № 4218880/24-28; заявл. 01.04.1987; опубл. 15.12.1088. – Бюл. № 46.
- [16] Нестеров, В.Н. Пат. 1795375 Российская Федерация, МПК G 01 B 17/10. Способ построения инвариантной измерительной цепи и инвариантный измерительный мост Нестерова В.Н. – № 4828085/21; заявл. 24.05.1990; опубл. 15. 02.1993. – Бюл. № 6.
- [17] 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. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2007. – Т. 3. – С. 18-37.
- [18] Левшина, Е.С. Электрические измерения физических величин / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 315 с.

Structures of absolutely invariant measurement systems and conditions for their physical realizability

V.N. Nesterov^{1,2}, A.R. Li¹

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

²Samara National Research University, Moskovskoe highway, 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The theory of constructing absolutely invariant measurement systems and transducers is presented. The theory develops the principle of two-channelity academician B.N. Petrov to the necessary and sufficient conditions for the physical realizability of the absolute invariance of the systems under consideration with respect to perturbing influences.