

М. В. Чернецов, П. П. Чураков

ИНВАРИАНТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

M. V. Chernetsov, P. P. Churakov

INVARIANT TRANSFORMATION IN MEASURING SYSTEMS WITH PARAMETRIC SENSORS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются измерительные цепи с параметрическими датчиками, описываемые схемой замещения в виде двухполюсной электрической цепи, и математические модели алгоритма инвариантного преобразования, обеспечивающие независимость результата измерения информативного параметра датчика от неинформативных. Важным при этом является определение и математическое описание с общих позиций условий реализуемости инвариантного преобразования для датчиков, параметры которых в процессе измерительного эксперимента переменны и зависят как от измеряемой физической величины, так и от условий эксплуатации. Целью работы является формализация условий обеспечения инвариантности при измерении значения информативного параметра датчиков, описываемых электрической схемой замещения с переменными параметрами. **Материалы и методы.** Показано, что инвариантность преобразования обеспечивается в ограниченном интервале наблюдения с допустимой погрешностью аддитивного и мультипликативного характера, обусловленной влиянием неинформативных параметров. Проведен анализ данных погрешностей и возможные пути снижения их влияния на результат измерения в одноканальных и многоканальных структурах измерительных преобразователей. **Результаты.** Получены математические модели, описывающие алгоритмы инвариантного преобразования в одноканальных и многоканальных структурах измерителей с учетом погрешностей от влияния неинформативных параметров. Показана возможность упрощения алгоритмов преобразования, основанных на анализе амплитудно-временных характеристик составляющих напряжения измерительных цепей при использовании тестового воздействия в зависимости от топологии схемы замещения датчика. **Выводы.** Развита теория инвариантного преобразования в части уточнения условий реализуемости при измерениях значений информативных параметров датчиков, описываемых двухполюсной электрической схемой замещения с изменяющимися параметрами. Формализован алгоритм проектирования схем измерительных цепей, обеспечивающих снижение погрешностей мультипликативного характера от влияния неинформативных параметров за счет выбора требуемого тестового воздействия на датчик. Анализ приведенных примеров построения схем измерительных цепей подтверждает полученные теоретические результаты.

A b s t r a c t. Background. The object of the study are measuring circuits with parametric sensors, described by the circuit of a two-pole electrical circuit, and mathematical models of the invariant transformation algorithm, ensuring the independence of the result of measuring the informative parameter of the sensor from non-informative ones. Important in this case is the definition and mathematical description from the general viewpoint of the realizability conditions of the invariant transformation for sensors whose parameters in the process of the measurement experiment are variable and depend on both the measured physical quantity and the operating conditions. The purpose of the work is to formalize the conditions for ensuring invar-

iance when measuring the value of the informative parameter of the sensors described by the electric circuit of substitution with variable parameters. **Materials and methods.** It is shown that the invariance of the transformation is ensured in a limited observation interval with an admissible error of additive and multiplicative nature due to the influence of noninformative parameters. The analysis of the data of errors and possible ways of reducing their influence on the measurement result in single-channel and multichannel structures of measuring transducers is carried out. **Results.** Mathematical models describing the algorithms of invariant transformation in single-channel and multichannel structures of meters with allowance for errors from the influence of non-informative parameters are obtained. The possibility of simplifying the algorithms for transforming the amplitude-time characteristics of the component voltages of the measuring circuits based on the analysis using the test action depending on the topology of the sensor replacement circuit is shown. **Conclusions.** The positions of the theory of invariant transformation are developed in the part of refinement of the realizability conditions for measurements of the values of the informative parameters of the sensors described by a two-pole electrical substitution circuit with varying parameters. The algorithm for designing circuits of measuring circuits that reduce the errors of a multiplicative nature from the influence of non-informative parameters by selecting the required test action on the sensor is formalized. The analysis of the given examples of construction of circuits of measuring circuits confirms the obtained theoretical results.

К л ю ч е в ы е с л о в а: инвариантное преобразование, параметрический датчик, схема замещения, измерительная цепь, измерительный преобразователь.

Key words: invariant transformation, parametric sensor, replacement circuit, measuring circuit, measuring transducer.

Растущие потребности по точности и достоверности получаемой информации вынуждают рассматривать параметрический датчик (ПД) в виде сложного объекта исследования, описываемого многоэлементной электрической схемой замещения (СЗ). Измеряемая физическая величина определяется, как правило, значением одного элемента СЗ (информативным параметром ПД), а остальные элементы принимают неинформативными. Учитывая, что ПД является первым звеном измерительного тракта, оказывающим наибольшее влияние на точность средства измерения в целом, а параметры ПД переменны и зависят не только от измеряемой физической величины, но и от условий эксплуатации, формализация требований, обеспечивающих инвариантность преобразования информативного параметра ПД [1] относительно неинформативных, является, несомненно, актуальной задачей.

В общем случае выходное напряжение измерительной цепи (ИЦ) определяется топологией СЗ и подаваемым на ИЦ тестовым воздействием $F(p) = F[\mathcal{E}_0(p), X_0(p)]$, обеспечивающим заданный энергетический режим в ПД, где $\mathcal{E}_0(p)$ – источник энергии (ток, напряжение), а $X_0(p)$ – пассивный эталонный электрический элемент, включаемый в ИЦ в качестве меры сравнения [2]. Полагая, что схема замещения ПД удовлетворяет условиям линейности, можем записать уравнение, описывающее выходное напряжение ИЦ

$$U_{\text{ИЦ}}(p) = U[\mathcal{E}_0(p), X_0(p), Z_{\text{ПД}}(p)] = U[F(p), Z_{\text{ПД}}(p)], \quad (1)$$

где $Z_{\text{ПД}}(p) = f_x(p, X_1, X_2, \dots, X_n)$ – функция, описывающая комплексное сопротивление или проводимость ПД; n – число элементов в схеме замещения ПД; p – оператор Лапласа.

В уравнении (1) n неизвестных и оно исходно неразрешимо относительно информативного параметра X_i .

Суть инвариантного преобразования в реализации такого алгоритма обработки $W(p)$ напряжения ИЦ, который обеспечивает получение сигнала Y , однозначно определяемого значением информативного параметра X_i , т.е.

$$Y = W(p)[U_{\text{иц}}(p)] = KU[F(p), X_i(p)] = KU_{X_i}(p), \quad (2)$$

где K – размерный коэффициент; $U_{X_i}(p)$ – составляющая напряжения ИЦ, определяемая значением только информативного параметра ПД X_i [1–4].

Однако топология СЗ ПД может быть сложной и содержать более двух элементов, значения которых переменны и меняются случайным образом. Поэтому в общем случае инвариантное преобразование параметров ПД реализуется с допустимой погрешностью преобразования, обусловленной влиянием неинформативных параметров, и достигается в ограниченном интервале времени при обработке амплитудно-временных характеристик или в интервале частот (фаз) при обработке амплитудно-частотных (фазовых) характеристик напряжения ИЦ, который для удобства записи уравнений обозначим интервалом наблюдения $\Delta\Psi$. Соответственно, аддитивное влияние неинформативных параметров X_j в этом интервале $\Delta\Psi$ можно описать уравнением

$$N_a(p)\{U[F(p), f(x_j, p)]\} = \Delta a, \quad (3)$$

где $f(x_j, p)$ – функция, описывающая влияние неинформативных параметров x_j , $j = \overline{1, n-1}$, $N_a(p)$ – оператор алгоритма обработки ИП, Δa – допустимая погрешность преобразования, обусловленная влиянием неинформативных параметров. В идеальном случае, при $\Delta a = 0$ погрешность преобразования от влияния неинформативных параметров отсутствует. При $\Delta a \neq 0$ погрешность может быть либо постоянной, проявляясь как смещение результата преобразования (2) на величину $\Delta a = \text{const}$, которое легко устраняется при известном значении Δa , либо переменной, для устранения которой необходимо иметь математическое описание изменения погрешности Δa в пределах $\Delta\Psi$. Соответствующую операцию можно представить как вычитание погрешности Δa из результата преобразования.

Мультипликативное влияние неинформативных параметров и дестабилизирующих факторов в интервале $\Delta\Psi$ можно описать уравнением

$$N_m(p)\{U[F(p), f(x_j, p)]\} = \Delta m, \quad (4)$$

где Δm – допустимая погрешность преобразования. В идеальном случае, при $\Delta m = 1$ неинформативные параметры ПД не влияют на результат преобразования. Если $\Delta m \neq 1$, то для обеспечения инвариантности достаточно либо определить значение постоянной величины Δm , либо определить уравнение, описывающее изменение погрешности Δm в пределах интервала наблюдения $\Delta\Psi$. Соответствующая операция коррекции представляется как деление результата преобразования на Δm .

При комбинированном влиянии неинформативных и дестабилизирующих параметров приоритетность выполнения операций коррекции погрешностей (3) и (4) определяется принятым алгоритмом обработки напряжения ИЦ.

Следует отметить, что условие инвариантного преобразования параметров X_i во временной области можно сформулировать как условие обеспечения ортогональности [2], при выполнении которого влияние неинформативных параметров равно нулю, т.е.

$$\int_{t_i}^{t_i+\Delta T} U_{X_i}(t)U_{X_j}(t)dt \equiv 0, \text{ при } i \neq j. \quad (5)$$

В результате, если обеспечивается инвариантное преобразование, то

$$\int_{t_i}^{t_i+\Delta T} U_{X_i}(t)U_{X_j}(t)dt = \text{const} \neq 0, \text{ при } i = j. \quad (6)$$

Условия (5–6), в сущности, являются необходимыми для обеспечения измерения информативного параметра ПД независимо от значений неинформативных параметров. Соответ-

ственно, достаточное условие определяется возможностью реализации алгоритма преобразования (2) в интервале $\Delta\Psi$.

Отметим, что инвариантное преобразование информативного параметра X_i ПД, описываемое уравнениями (2)–(6), может быть реализовано методами прямого преобразования в одноканальных ИП.

При необходимости измерения нескольких параметров ПД организуются дополнительные каналы передачи напряжения ИЦ. При этом уравнение (1) можно переписать для каждого из каналов в удобной для анализа форме [1, 2]

$$U_{\text{ИЦ}k}(p) = \sum_{l=1}^n B_{kl}(p) X_l, \quad (7)$$

где $B_{kl}(p) = \sum_{r=0}^q b_{kl,r} p^r$ – полиномиальный коэффициент; $k = \overline{1, n}$ – номер канала передачи напряжения ИЦ; $l = \overline{1, n}$ – номер параметра ПД (элемента СЗ); $r = \overline{0, q}$ – порядок линейного дифференциального уравнения, $b_{kl,r}$ – составляющая полиномиального коэффициента порядка r .

Решение системы уравнений (7) относительно искомого параметра X_i находится в виде [1]

$$X_i(p) = \frac{Det_i(p)}{Det(p)}, \quad (8)$$

где $Det(p) = \|B_{kl}(p)\|$, а $Det_i(p)$ – определитель, получаемый из $Det(p)$ заменой i -го столбца на столбец из результатов $U_{\text{ИЦ}k}(p)$ каждого канала (7).

При этом определитель, описывающий влияние j -го неинформативного параметра датчика на информативный, запишется в виде

$$Det_{ji}(p) = \sum_k B_{kj}(p) \cdot M_{ki}(p) = 0, \quad (9)$$

так как коэффициенты i -го и j -го столбцов в идеальном случае должны быть равны, что определяет требования по идентичности параметров каналов передачи напряжения ИЦ. В уравнении (9) $M_{ki}(p)$ – минор, получаемый из определителя $Det(p)$ вычеркиванием j -й строки и i -го столбца.

Соответственно, условия инвариантного преобразования реализуются, если оператор преобразования по неинформативному j -му параметру ПД описывается уравнением

$$W(p) = \frac{Det_{ji}(p)}{Det(p)} = \frac{D'_{ji}(p) - D''_{ji}(p)}{Det(p)} = [W'(p) - W''(p)] = 0, \quad (10)$$

где $Det(p) = Det'_{ji}(p) - Det''_{ji}(p)$.

Из уравнения (7) следует, что дополнительным условием физической реализуемости методов измерения более одного параметра ПД является наличие в ИП не менее двух каналов передачи напряжения ИЦ [1, 2, 4].

Достоинством многоканальных ИП является возможность определения значений нескольких элементов СЗ (по сути электрических параметров датчика) ПД [2–5].

Таким образом, инвариантное преобразование может быть достигнуто в одноканальных (2) и многоканальных (7) структурах ИП прямого преобразования на основе методов анализа амплитудно-временных [2–5], амплитудно-частотных и фазовых характеристик напряжения ИЦ [6]. Применение в многоканальных ИП методов уравнивающего преобразования на основе регулируемых параметрических моделей элементов СЗ ПД [7] или компенсации составляющих напряжения ИЦ [8] ограничивается их невысоким быстродействием.

Наиболее простая схема ИЦ и алгоритм инвариантного преобразования реализуются, когда информативный элемент включен либо последовательно с остальными неинформативными элементами схемы замещения ПД, либо параллельно с ними. В этом случае в выходном

напряжении ИЦ может быть сформирована одна отдельная составляющая, определяемая однозначно значением только информативного параметра ПД. При этом существенное упрощение задачи проектирования схемы ИЦ достигается при использовании рекомендаций по выбору требуемого тестового воздействия $F(p)$, изложенных в работе [2], позволяющих комбинировать различные виды источника $\mathcal{E}_0(p)$ и эталонного электрического элемента $X_0(p)$.

В качестве примера рассмотрим алгоритм инвариантного преобразования параметров индуктивного ПД, включенного в активную ИЦ (рис. 1), построенную на базе операционного усилителя (ОУ). Трехэлементная СЗ составлена из информативного элемента L_x и неинформативных элементов: R_x , имитирующего сопротивление провода катушки индуктивности и вихревые потери ПД, и C_x , имитирующего совместное влияние распределенной межвитковой емкости и емкостей между выводами ПД и соединительными проводами от ПД к ИЦ. Из СЗ ПД следует, что для получения информативной составляющей напряжения ИЦ постоянной амплитуды целесообразно в качестве тестового воздействия использовать линейно изменяющийся ток, который наиболее просто задать с помощью входного напряжения U_0 и токозадающего эталонного элемента (меры сравнения) индуктивности L_0 .

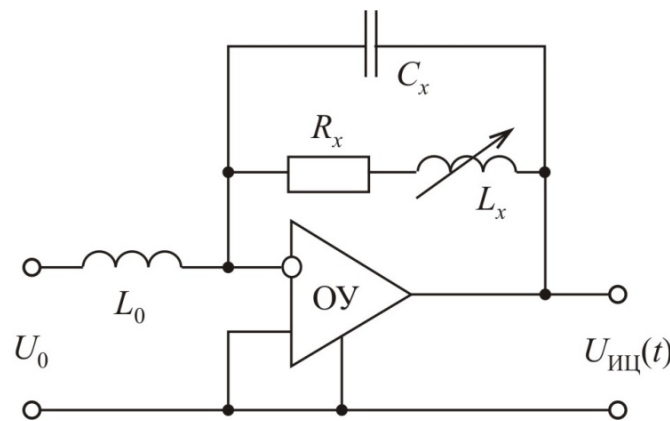


Рис. 1. Схема ИЦ с индуктивным ПД

В результате выходное напряжение ИЦ описывается выражением [2]:

$$U_{\text{ИЦ}}(t) = U_0 \left[\frac{L_x}{L_0} - \frac{R_x^2 C_x}{L_0} + \frac{R_x t}{L_0} - \frac{L_x}{L_0} k e^{-\frac{t}{2L_x/R_x}} \sin(\omega t + \theta) \right]. \quad (11)$$

Из анализа уравнения (11) следует, что вторая составляющая $U_0 R_x^2 C_x / L_0$ не удовлетворяет условиям ортогональности (5–6), так как описывается одинаковой с информативной составляющей $U_0 L_x / L_0$ временной зависимостью, т.е. представляет собой аддитивную погрешность преобразования (3). Эта погрешность неразличима от информативной составляющей и методами прямого преобразования напряжения ИЦ не выделяется.

Применение методов уравнивающего преобразования на уровне регулируемой модели элементов СЗ ПД решает задачу инвариантного преобразования, но ограничивается из-за низкого быстродействия.

По окончании времени t_3 затухания гармонической составляющей из (11) имеем

$$U_{\text{ИЦ}}(t)_{t > t_3} = U_0 \left[\frac{L_x}{L_0} - \frac{R_x^2 C_x}{L_0} + \frac{R_x t}{L_0} \right]. \quad (12)$$

Если по истечении времени t_3 измерить мгновенные значения напряжения ИЦ в моменты времени T_1 и T_2 , то получим два сигнала U_1 и U_2 (т.е. два канала преобразования), кото-

рые описываются уравнениями, получаемыми из уравнения (12) подстановкой вместо t значений T_1 и T_2 , а вместо $U_{\text{иц}}(t)$ измеренных значений U_1 и U_2 соответственно. Решение данной системы находится в виде

$$L_x = \frac{U_1 T_2 - U_2 T_1}{U_0 (T_2 - T_1)} L_0 - R_x^2 C_x \quad \text{и} \quad R_x = \frac{(U_2 - U_1) L_0}{U_0 (T_2 - T_1)}. \quad (13)$$

Погрешность $R_x^2 C_x$ аддитивного характера обусловлена влиянием неинформативных параметров (3). Ее можно представить в виде суммы систематической Δ_c и случайной Δ_c° погрешностей. Систематическую погрешность можно определить в ходе предварительных статических измерений параметров ПД, например, методами уравнивающего преобразования и учесть при измерениях L_x в процессе эксплуатации ПД, а случайной погрешностью в виду малости можно пренебречь.

В рассмотренном примере не учтены динамические погрешности, обусловленные нестабильностью параметров ПД (значений элементов СЗ) в процессе эксплуатации в течение интервала наблюдения $\Delta\psi$. Для снижения динамической погрешности следует, с одной стороны, уменьшать длительность измерительного эксперимента, а с другой – повышать быстродействие используемой элементной базы.

Проведенный анализ показал, что в общем случае инвариантное преобразование информативного параметра ПД, описываемого двухполюсной электрической СЗ, в ИП прямого преобразования реализуется в ограниченном интервале наблюдения $\Delta\psi$ с погрешностью (3–4), определяемой влиянием неинформативных параметров ПД и их нестабильностью в процессе эксплуатации. В ИП уравнивающего преобразования на основе регулируемой параметрической модели элементов СЗ ПД или компенсации составляющих напряжения ИЦ имеется возможность устранения погрешности, вносимой неинформативными параметрами, но низкое быстродействие ограничивает их применение. Синтез схемы ИЦ и алгоритма преобразования упрощается при выборе тестового воздействия с учетом топологии СЗ, при этом расширяются возможности выбора энергетического воздействия и типа образцового элемента сравнения в ИЦ.

Библиографический список

1. Петров, Б. Н. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б. Н. Петров, В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – М. : Наука, 1976. – 244 с.
2. Чернецов, В. И. Развитие теории и совершенствование унифицирующих измерительных преобразователей для параметрических датчиков : дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Чернецов. – Пенза, 2000. – 359 с.
3. Чернецов, М. В. Унифицирующие измерительные преобразователи физических величин на базе резистивно-емкостных датчиков : дис. ... канд. техн. наук / М. В. Чернецов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2001. – 254 с.
4. Свистунов, Б. Л. Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности / Б. Л. Свистунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 94–100.
5. Чернецов, М. В. Измерительные преобразователи параметров двухэлементных электрических цепей на основе методов амплитудно-временной селекции / М. В. Чернецов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 10. – С. 42–46.
6. Арш, Э. И. Автогенераторные методы и средства измерений / Э. И. Арш. – М. : Машиностроение, 1979. – 256 с.
7. Передельский, Г. И. Мосты с отдельным уравниванием по трем параметрам / Г. И. Передельский // Измерительная техника. – 1980. – № 9. – С. 49–50.
8. Мелик-Шахназаров, А. М. Компенсационные измерительные устройства систем автоконтроля на переменном токе / А. М. Мелик-Шахназаров, И. А. Шайн, Е. Г. Абарин. – М. : Энергия, 1971. – 128 с.

Чернецов Михаил Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
технического управления качеством,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kafedratuk@yandex.ru

Chernetsov Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of technical
quality management,
Penza State Technology University
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street,
Penza, Russia)

Чураков Петр Павлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Churakov Petr Pavlovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information -measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317

Чернецов, М. В.

Инвариантное преобразование в измерительных системах с параметрическими датчиками /
М. В. Чернецов, П. П. Чураков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). –
С. 11–17. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-2.