

УДК 621.3.083.71

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПА ИНВАРИАНТНОСТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МАЛОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ПРЕОБРАЗУЕМЫХ В СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

Кутлюяров Г.Х., Идрисова Э.Р.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет
e-mail: kutluyarov-app@yandex.ru*

***Аннотация.** В предлагаемой статье рассматривается вопрос применения принципа многоканальной и селективной инвариантности для построения универсальной малопроводной системы измерения параметров, преобразуемых в сопротивление резистивных датчиков. Разомкнутая структура преобразователя сопротивления резистивных датчиков (ПСРД) позволяет обеспечить инвариантность к изменению параметров канала связи при минимальном числе пассивных преобразующих элементов в зоне измерения. Это позволяет проводить работы в тяжёлых условиях, например, при измерениях в условиях высоких стационарных температур, что характерно для целого ряда предприятий нефтегазовой промышленности.*

***Ключевые слова:** преобразование сопротивления датчиков, канал связи, инвариантность, измерительная система*

Введение

В самых различных областях народного хозяйства, в том числе и на предприятиях нефтяной промышленности, не теряет актуальности сбор и обработка все большего количества информации. Решение этой проблемы требует создания новых измерительных систем (ИС), обладающих высокой точностью и надежностью. Структура ИС различных физических величин, характеризующих технологические процессы, включает измерительные преобразователи (ИП), среди многообразия которых выделяются ИП с электрическими выходными параметрами – током, напряжением, сопротивлением, емкостью, индуктивностью, частотой и фазой. К наиболее точным из перечисленных преобразователей физических величин в электрические относятся резистивные датчики, имеющие в качестве информативного параметра активное сопротивление – термопреобразователи сопротивления, термоанемометрические датчики с прямым и косвенным подогревом, тензорезисторы и другие, основанные на самых различных физических эффектах. Резистивные датчики отличаются хорошими метрологическими характеристиками – точностью, стабильностью, надежностью и долговечностью, а преобразователи их сопротивления могут иметь достаточно простые структурные схемы.

Датчики могут быть размещены в непосредственной близости от места отображения, регистрации или обработки информации или, что бывает чаще, удалены от него. В последнем случае ПСРД содержат канал связи (КС) и могут

являться элементами ИС как совокупности функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, характеризующихся наличием одного или нескольких каналов связи. В случае проводного канала в виде линии небольшой протяженности (десятки, иногда сотни метров), согласно установившейся традиции, речь идет о дистанционных измерениях, а при ее большей длине – о телеизмерениях. В связи с этим задача обеспечения инвариантности т.е. независимости результатов преобразования от неинформативных параметров, в частности, параметров КС, на точность преобразования сопротивления датчика представляется неотделимой от задач, связанных с разработкой систем ПСРД.

Обычно минимизация влияния параметров КС связана с предварительным активным преобразованием сопротивления датчика в величину, мало зависящую от параметров КС, – частоту, временной интервал, цифровой код, или же с увеличением числа проводов линии связи при пассивном преобразовании на входе КС. В первом случае имеет место значительное усложнение структуры малопроводных систем ПСРД, в частности, за счет активных элементов (кодировщиков, генераторов, усилителей, фильтров и т.д.), расположенных в зоне преобразования и ведет к снижению надежности и удорожанию ИС. Во втором случае обеспечение максимальной простоты преобразования на входе КС вследствие использования только пассивных элементов традиционно связано с проявлением таких отрицательных качеств ИС с многопроводными линиями, как их удорожание за счет повышения расхода цветного металла и вносимых причинами технологического порядка ограничений сферы применения. В существующих малопроводных ПСРД с пассивным преобразованием на входе КС обычно существует жесткая привязка к функциональному назначению ИС.

В связи с этим разработка универсальных ИС повышенной надёжности с частичной и полной инвариантностью к неинформативным параметрам, вызванными наличием КС, с максимально простым преобразованием на входе КС является актуальной и необходимой задачей. При этом авторы предлагают концепцию функциональной заменяемости расположенных в зоне измерения элементов и пересчёта уравнения преобразования параметров без кардинального изменения структуры ИС за счёт введения контроллера для управления процессом измерения.

О применении многоканальной и селективной форм инвариантности для построения оптимальной структуры ПСРД с пассивным преобразованием на входе КС

Алгоритмические (структурные) методы имеют целью обеспечение нормальной работы ИС при действии влияющих факторов. Представляет несомненный интерес случай, когда параметры структуры ИС, находящиеся в зоне воздействия влияющих факторов, должны оставаться неизменными в течение полного

цикла преобразования, т.е. должна обеспечиваться лишь их кратковременная стабильность.

Сигнал на входе приёмной части ИС является функцией параметров всех элементов цепи – измерительный преобразователь (ИП) – канал связи (КС), включающий как информативные, так и неинформативные параметры, т.е. $P_1, P_2, \dots, P_n \in P$ и в общем случае может быть описан функционалом

$$V(P, A, t) = 0, \quad (1)$$

где A – параметр, отражающий вид (ток, напряжение) и форму (синус, меандр и т.д.) электрического воздействия на ИС, включающую ИП и КС;

t – текущее время.

Интерпретируя выражение (1) применительно к построению ПСРД и ограничиваясь рассмотрением условий инвариантности к возмущениям, действующим на ИП и КС, можно отметить, что множество P содержит параметры $P_x, P_{ИП}, P_{КС}$, являющиеся функционалами преобразуемого сопротивления датчика R_x , а так же параметров ИП и КС с учётом воздействия на последний дестабилизирующих факторов. Следовательно, имеем

$$V(P_x, P_{ИП}, P_{КС}, A, t) = 0. \quad (2)$$

Смысл этого выражения заключается в том, что сигнал, передаваемый по КС, в общем случае представляет собой композицию ряда составляющих, каждая из которых является функцией как P_x , так и $P_{ИП}$ и $P_{КС}$.

Процесс инвариантного преобразования электрических величин, в том числе и активного сопротивления, с передачей информации по проводным КС т.е. процесс получения информации о P_x независимо от других параметров может быть реализован различными методами: выбором соответствующей структуры преобразования, заданием вида и формы электрического воздействия на ИС, а также выбором соответствующего алгоритма обработки измерительной информации, которая может производиться в аналоговой или цифровой форме.

Используя многоканальную [1] и селективную [2] формы инвариантности, можно добиться исключения или минимизации влияния на точность преобразования сопротивления резистивных датчиков всех медленно изменяющихся неинформативных параметров КС. В методах, основанных на реализации разомкнутых структур ПСРД [3], не происходит физической компенсации влияния возмущающих воздействий. Дополнительные каналы здесь необходимы для введения определённой информативной избыточности. Что касается способа разделения каналов передачи информации, наличие двухпроводной линии связи предполагает их временное разделение, что обеспечивает практически полную идентичность таких каналов, обуславливая, однако, наличие минимум двух тактов в цикле преобразования.

В общем случае для достижения полной инвариантности к неинформативным параметрам канала связи – активному сопротивлению линии (АСЛ), реактив-

ному сопротивлению линии (РСЛ), сопротивлению изоляции проводов (СИП), отражающих утечки и напряжению стационарных электрических полей (СЭП), являющихся некоррелированными величинами, необходимо, чтобы система включала бы не менее пяти уравнений вида

$$V(\Pi_x, \Pi_{ИП}, \Pi_{Rл}, \Pi_P, \Pi_{Ry}, \Pi_E, A, t) = 0, \quad (3)$$

где $\Pi_{Rл}, \Pi_P, \Pi_{Ry}, \Pi_E$ – не подлежащие измерению параметры КС, зависящие от АСЛ, РСЛ, СИП и СЭП соответственно.

Число уравнений в принципе может быть уменьшено до четырёх, если измерения проводятся на постоянном токе, когда один из неинформативных параметров КС – реактивная составляющая его сопротивления и соответственно его параметр Π_P обращается в нуль.

С учётом параметров измерительного преобразователя находящегося в зоне измерения – $\Pi_{ИП}$ имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned} V_1(\Pi_x, \Pi_{ИП}, \Pi_{Rл}, \Pi_P, \Pi_{Ry}, \Pi_E, A, t) &= 0; \\ V_2(\Pi_x, \Pi_{ИП}, \Pi_{Rл}, \Pi_P, \Pi_{Ry}, \Pi_E, A, t) &= 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$V_4(\Pi_x, \Pi_{ИП}, \Pi_{Rл}, \Pi_P, \Pi_{Ry}, \Pi_E, A, t) = 0,$$

которую можно записать в виде

$$\begin{aligned} y_1 &= F_1(\Pi_x, \Pi_{ИП}, \Pi_{Rл}, \Pi_P, \Pi_{Ry}, \Pi_E, A, t) = 0 \\ y_2 &= F_2(\Pi_x, \Pi_{ИП}, \Pi_{Rл}, \Pi_P, \Pi_{Ry}, \Pi_E, A, t) = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$y_4 = F_4(\Pi_x, \Pi_{ИП}, \Pi_{Rл}, \Pi_P, \Pi_{Ry}, \Pi_E, A, t) = 0,$$

где $y_1 - y_4$ – выходные величины каналов передачи информации.

Указанная система является разрешимой, очевидно, только в том случае, когда параметр $\Pi_{ИП}$, описывающий свойства измерительного преобразователя, является величиной постоянной, по крайней мере, в течение полного цикла преобразования. Соответственно обобщённое уравнение синтеза инвариантных ПСРД с разомкнутой структурой будет иметь вид

$$\Pi_x = F(y_1, y_2, \dots, y_4, \Pi_{ИП}, A). \quad (6)$$

Структура, реализующая обобщённое уравнение синтеза разомкнутой структуры инвариантных ПСРД, приведена на рис. 1.

Здесь с выхода измерительного преобразователя ИП (преобразовательного элемента ПЭ) по четырём идентичным каналам $K_1 - K_4$ информация в виде их выходных величин $y_i = F_i(\Pi_x, \Pi_{ИП}, A)$ поступает в промежуточный преобразователь ПП, а затем в устройство обработки УО, где происходит аппаратное решение системы уравнений (5) относительно сопротивления датчика, подлежащего преобразованию. Электрическое воздействие на ИП осуществляется через КС с помощью источника ИВ.

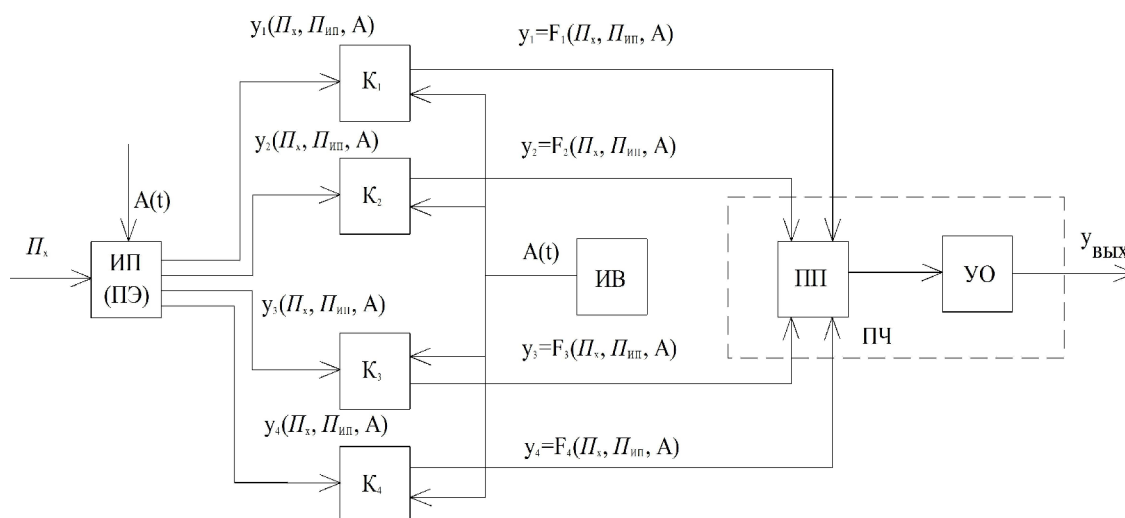


Рис. 1. Базовая структурная схема ПСРД с многоканальной формой инвариантности

В общем случае преобразуемая величина входит во все четыре уравнения системы (5), однако это условие не является необходимым при синтезе инвариантных ПСРД. Параметр P_x может входить в часть из указанных выражений или даже в одно, в зависимости от способа физической реализации структуры ПСРД.

При построении ПСРД с разомкнутой структурой можно обеспечивать частичную инвариантность или квазиинвариантность к неинформативным параметрам КС, в тех случаях, когда часть из них представляет собой величины, влияние которых на точность измерения незначительно.

Структурные схемы таких преобразователей будут являться частными случаями общей, приведённой на рис. 1. При этом, разумеется, упростится алгоритм преобразования, а значит, и УО, уменьшится длительность цикла преобразования, что может оказаться существенным при некоторых видах измерений, связанных, например, с процессами, имеющими высокую скорость протекания или измерениях, происходящих при высокой скорости перемещения датчика в среде.

Переходя к рассмотрению принципов использования селективной формы инвариантности при построении ПСРД, отметим, что указанная форма инвариантности, первоначально разработанная применительно к системам автоматического управления [4, 5] применима и к измерительным устройствам [6].

Реализация селективной формы инвариантности означает минимизацию чувствительности УО к параметрам, связанным с теми или иными возмущениями. Как показано в [7], обеспечение инвариантности в этом случае может быть связано с условием обращения в тождественный нуль оператора $S(D)$ общего оператора преобразования по подмножеству $P_{ин} \subset P$ неинформативных параметров:

$$C(D)V(P_{nl})=0, \quad (7)$$

где P_{nl} – параметр, являющийся функцией нагрузки линии связи.

Пути реализации указанного условия могут быть различными в зависимости от вида параметра. С нашей точки зрения, наибольший интерес представляет временная селекция или стробирование, основанная на различной информационной значимости сигнала в различные моменты времени.

Обобщённое условие инвариантности при этом имеет вид

$$V(P_{nl}, t)=0 \Rightarrow t \in [T_1, T_2], \quad (8)$$

т.е. путём оценки параметров сигнала на временном интервале можно получить инвариантную относительно P_{nl} информацию. На практике это условие проще выполнять с точностью до $\varepsilon \ll 1$, когда

$$V(P_{nl}, t)=\varepsilon \ll 1 \Rightarrow t \in [T_1, T_2]. \quad (9)$$

Данный метод обеспечения инвариантности наиболее органично сочетается с методами преобразования параметров, при которых имеют место апериодические переходные процессы.

Метод селекции по времени может быть весьма удачно применён и к решению задач, связанных с процессами, протекающими в системах с длинными линиями, в которых, особенно при работе на нелинейную нагрузку, происходят искажения фронтов импульсов напряжения. Так, если параметром, несущим полезную информацию, является амплитуда импульса, измеряемая фактически по его площади, то, исключая из процесса преобразования его искажённую часть, можно говорить о достижении инвариантности к РСЛ. Если же импульс имеет форму меандра, неучтённая погрешность, вызванная искажением фронтов, оказывается особенно большой и, соответственно, рассматриваемый метод даёт лучшие результаты. Уравнение синтеза инвариантных ПСРД в этом случае примет вид

$$V(P_p, P_{nl}, t)=\varepsilon \ll 1 \Rightarrow t \in [T_1, T_2], \quad (10)$$

где P_p – параметр, связанный с РСЛ.

При этом интервал $[T_1, T_2]$ может быть выбран на основе априорной информации о длительности искажённой части импульса.

Обращаясь к реализации метода временной селекции (рис. 2), следует отметить наличие в структуре приёмной части стробирующего блока СБ, который содержит ключевой элемент КЭ, управляемый формирователем стробирования ФС.

Методы построения ПСРД с разомкнутой структурой, реализующие многоканальную и селективную формы инвариантности, могут быть определены как комбинированные. При этом условия достижения инвариантности будут описываться выражениями (5) и (10).

Для упрощения реализации алгоритма преобразования, операцию стробирования оптимально проводить до вычислительных операций, связанных с минимизацией влияния на точность измерения остальных неинформативных параметров.

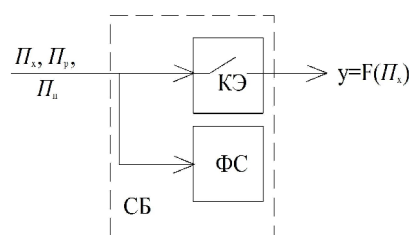


Рис. 2. Структура реализации временной селекции

Реализация методов инвариантного преобразования сопротивления резистивных датчиков в универсальной малопроводной ИС с ПСРД

Уравнение преобразования сопротивления резистивных датчиков в значительной степени зависит от правильности выбора эквивалента канала связи, в котором учитываются влияющие факторы, характерные для проведения дистанционных измерений: АСЛ, АСЛ и РСЛ, АСЛ, РСЛ и СИП, АСЛ, РСЛ, СИП и СЭП (СЭП – параметр, вызванный влиянием на КС стационарных электрических полей, например, э.д.с. поляризации горных пород E_n , наведённой на броню одножильного бронированного каротажного кабеля при измерениях в необсаженных скважинах) [3]. В общем случае двухпроводная длинная линия связи моделируется распределённой цепочечной структурой, но как показано в [8], может быть представлена локальным эквивалентом.

На рис. 3 приведена структурная схема универсальной малопроводной ИС с ПСРД, реализующая многоканальную и селективную формы инвариантности к влиянию изменения неинформативных параметров линии связи на точность измерения при условии пассивного преобразования на входе КС.

Пассивное преобразование на входе КС обеспечивает наличие в зоне измерения минимального числа элементов, что позволяет обеспечить надёжность устройства при тяжёлых условиях эксплуатации. Универсальность ИС заключается в реализации концепции функциональной заменяемости расположенных в зоне измерения элементов и пересчёта уравнения преобразования параметров без кардинального изменения структуры ИС за счёт введения контроллера для управления процессом измерения.

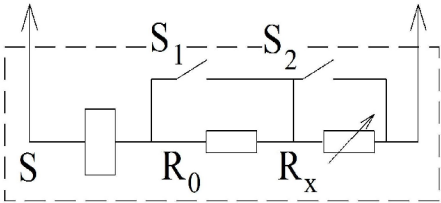
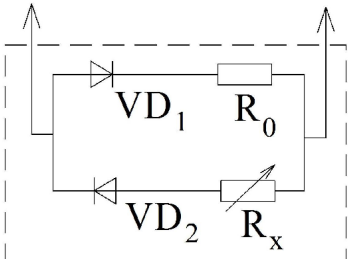
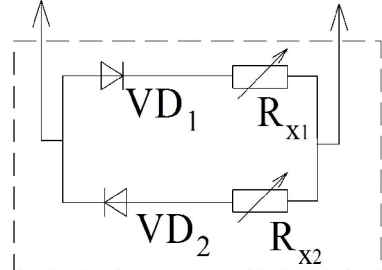


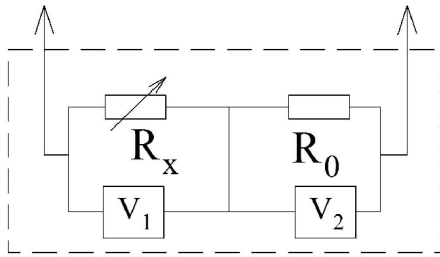
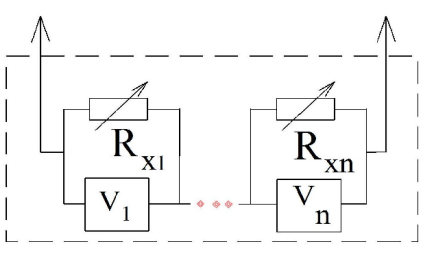
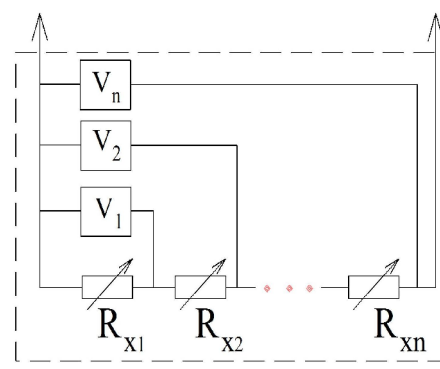
Рис. 3. Структурная схема универсальной малопроводной ИС с ПСРД

Метод ПСРД, используемый в ИС заключается в преобразовании напряжения на зажимах источника тока, соединённого с двухпроводной линией связи, другой конец которой подключён к преобразующим элементам в зоне измерения (ПЭЗИ) [9]. При этом можно исключить из уравнения преобразования неинформативные параметры, вызванные наличием КС [10 - 15]. Соответственно контроллер содержит модули управления ИИТ, снятия напряжения на зажимах ИИТ, обработки измерительной информации, линеаризации показаний (коррекции), а также выводы на АРМ оператора.

В табл. 1 приведены примеры ПЭЗИ, предполагающие как одноточечные так и многоточечные измерения [10 - 15].

Таблица 1

Номер	ПЭЗИ	Примечания
1		<p>R_x – резистивный датчик; R_0 – стабильный (образцовый) резистор; $\Delta R_x = R_x - R_0$ – информативный параметр; S – поляризованное реле</p> <p>[10]</p>
2		<p>R_x – резистивный датчик; R_0 – стабильный (образцовый) резистор; $\Delta R_x = R_x - R_0$ – информативный параметр; VD_1, VD_2 – диоды (диодные сборки)</p> <p>[11]</p>
3		<p>R_{x1}, R_{x2} – резистивные датчики, например, анемометрические и тензометрические, разность сопротивления которых необходимо измерить; $\Delta R_x = R_{x1} - R_{x2}$ – информативный параметр</p>

Номер	ПЭЗИ	Примечания
4		<p>V_1, V_2 – нелинейные элементы с рабочим участком вольт-амперной характеристики, параллельной оси токов</p> <p>[12]</p>
5		<p>R_{x1}, \dots, R_{xn} – резистивные датчики, V_1, \dots, V_n – нелинейные элементы с рабочим участком вольт-амперной характеристики, параллельной оси токов; информативный параметр – текущее значение сопротивления датчиков R_{x1}, \dots, R_{xn}</p> <p>[13,14]</p>
6		<p>R_{x1}, \dots, R_{xn} – резистивные датчики, V_1, \dots, V_n – нелинейные элементы с рабочим участком вольт-амперной характеристики, параллельной оси токов; информативный параметр – текущее значение сопротивления датчиков R_{x1}, \dots, R_{xn}</p> <p>[15]</p>

Выводы

1. Рассмотрены пути построения малопроводных ИС на базе ПСРД с разомкнутой структурой, с обеспечением инвариантности к медленно изменяющимся параметрам канала связи: АСЛ, РСЛ, СИП и СЭП.

2. Предложено два пути обеспечения инвариантности в малопроводных ИС. Первый основан на многоканальной, второй – на селективной (селекция по времени) формах инвариантности. Показано, что полная инвариантность к изменению параметров КС может быть достигнута только при использовании их комбинации.

3. Показано, что в ПСРД с разомкнутой структурой число измерительных каналов с временным разделением может варьироваться от двух до четырёх, в зависимости от числа минимизируемых неинформативных параметров. Приведены базовые структурные схемы преобразования и обобщенные уравнения синтеза для каждой группы методов построения инвариантных ПСРД.

4. Приведена структурная схема универсальной малопроводной ИС с ПСРД, реализующая концепцию функциональной заменяемости расположенных в зоне измерения преобразовательных элементов, а также пересчёта уравнения преобразования без кардинального изменения структуры ИС.

Литература

1. Петров Б.Н., Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Принцип инвариантности в измерительной технике М.: Наука, 1976. 243с.

2. Кулебакин В.С. Теория инвариантности автоматических регулируемых и управляемых систем // Труды 1-го международного конгресса IFAC. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 447 - 455.

3. Кутлуяров Г.Х. Разработка и исследование методов построения преобразователей сопротивления резистивного датчика для малопроводных средств измерения параметров технологических процессов в нефтяной промышленности: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.05. Пенза, 1983. 20 с.

4. Кулебакин В.С. Операторное $K(D)$ изображение функций и его практическое применение // Труды ВВИА им. Жуковского. М., 1958. Вып. 695. С. 345 - 368.

5. Кулебакин В.С. Теория инвариантности автоматических регулируемых и управляемых систем // Труды 1-го международного конгресса IFAC. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 447 - 455.

6. Мартяшин А.И., Шахов Э.Л., Шляндин В.М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М.: Энергия, 1976. 392с.

7. Свистунов Б.Л. Разработка и исследование инвариантных преобразователей параметров электрических цепей в унифицированные сигналы: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.11.05. Пенза, 1978. 20 с.

8. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1969. 424 с.

9. А.с. 775636 (СССР). Термометр. Кутлуяров Г.Х., Коловертнов Ю.Д., Дамрин Е.С., Жевак В.С. Опубл. в Б.И., 1980, № 40. МКИ G 01 K 7/16.

10. А.с. 775635 (СССР). Устройство для измерения температуры. Коловертнов Ю.Д., Кутлуяров Г.Х. Опубл. в Б.И., 1980, № 40. МКИ G 01 K 7/16.

11. А.с. 796770 (СССР). Преобразователь сопротивления резистивного датчика в отношении двух напряжений. Кутлуяров Г.Х. Опубл. в Б.И.; 1981, № 2. МКИ G 01K 27/02.

12. А.с. 1035210 (СССР). Устройство для измерения температуры в скважинах. Кутлуяров Г.Х., Коловертнов Ю.Д., Жевак В.С., Дамрин Е.С., Молчанов А.А., Чёрный В.Б. Оpubл. в Б.И.; 1983, № 30. МКИ G 01 K 27/02.

13. А.с. 957116 (СССР). Преобразователь сопротивления датчиков глубинных параметров. Кутлуяров Г.Х., Коловертнов Ю.Д., Жевак В.С., Дамрин Е.С., Молчанов А.А., Чёрный В.Б. Оpubл. в Б.И., 1982, 33. МКИ G 01 K 17/2.

14. А.с. 1164627 (СССР). Многоточечный преобразователь сопротивления резистивных датчиков. Кутлуяров Г.Х., Коловертнов Ю.Д., Жевак В.С., Дамрин Е.С., Молчанов А.А. Оpubл. в Б.И., 1985, 24. МКИ G 01 R 27/2.

15. А.с. 1298515 (СССР). Преобразователь сопротивления резистивных датчиков. Кутлуяров Г.Х. Оpubл. в Б.И., 1987, 11. МКИ G 01 R 27/2.

**ABOUT APPLICATION OF INVARIANCE PRINCIPLE
FOR THE CONSTRUCTION OF A UNIVERSAL LOW-WIRED SYSTEM
FOR MEASUREMENT OF PARAMETERS
THAT CAN BE TRANSFORMED INTO
RESISTIVE SENSORS RESISTANCE**

G.Kh. Kutluyarov, E.R. Idrisova

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

e-mail: kutluyarov-app@yandex.ru

Abstract. *This article discusses the application of the principle of multi-channel and selective variance for the construction of the universal low-wired measurement system can be transformed into a resistance resistive sensors. Open structure of the transducer resistance resistive sensors (CRRS) allows to provide invariance to modify the parameters of communication channel with a minimum number of passive transforming elements in the measurement zone. This allows work in harsh conditions, such as the measurements at high steady-state temperatures, which is characteristic of oil and gas industry enterprises.*

Keywords: *sensor resistance conversion, channel, invariance, measuring system*

References

1. Petrov B.N., Viktorov V.A., Lunkin B.V., Sovlukov A.S. Printsip invariantnosti v izmeritel'noi tekhnike (An invariance principle in measurement technology). Moscow, Nauka, 1976. 243 p.
2. Kulebakin B.C. Teoriya invariantnosti avtomaticheskikh reguliruemyykh i upravlyaemykh sistem (Invariance theory of automatic regulated and controlled systems), *Trudy 1-go mezhdunarodnogo kongressa IFAC (Proceedings of the First international congress of the IFAC)*. Moscow, AN SSSR, 1961. PP. 447 - 455.
3. Kutluyarov G.Kh. Razrabotka i issledovanie metodov postroeniya preobrazovatelei soprotivleniya rezistivnogo datchika dlya maloprovodnykh sredstv izmereniya parametrov tekhnologicheskikh protsessov v neftyanoi promyshlennosti (Design and study of sensors resistance converters for low-wired measurement of processes in the oil industry). PhD thesis abstract. Penza, 1983. 20 p.
4. Kulebakin B.C. Operatornoe $K(D)$ izobrazhenie funktsii i ego prakticheskoe primeneniye (Operator $K(D)$ representation of function and its practical application), *Trudy VVIA im. Zhukovskogo (Proceedings of Zhukovsky Air Force Engineering Academy)*. Moscow, 1958. Issue 695. PP. 345 - 368.
5. Kulebakin B.C. Teoriya invariantnosti avtomaticheskikh reguliruemyykh i upravlyaemykh sistem (Invariance theory of automatic regulated and controlled systems) in *Trudy 1-go mezhdunarodnogo kongressa IFAC (Proceedings of the First international congress of the IFAC)*. Moscow, AN SSSR, 1961. PP. 447 - 455.

6. Martyashin A.I., Shakhov E.L., Shlyandin V.M. Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya (Electrical parameters transducers for control and measurement systems). Moscow, Energiya, 1976. 392s.

7. Svistunov B.L. Razrabotka i issledovanie invariantnykh preobrazovatelei parametrov elektricheskikh tsepei v unifikirovannye signaly (Development and study of invariant parameters converters of electrical circuits in standard signals). PhD thesis abstract. Penza, 1978. 20 p.

8. Atabekov G.I. Osnovy teorii tsepei (Fundamentals of the circuit theory). Moscow, Energiya, 1969. 424 p.

9. USSR author's certificate № 775636. IPC G 01 K 7/16. Thermometer / Kutluyarov G.Kh., Kolovertnov Yu.D., Damrin E.S., Zhevak B.C. Publ.: 1980.

10. USSR author's certificate № 775635. IPC G 01 K 7/16. Ustroistvo dlya izmereniya temperatury (Temperature measuring device) / Kolovertnov Yu.D., Kutluyarov G.Kh. Publ.: 1980.

11. USSR author's certificate № 796770. IPC G 01K 27/02. Preobrazovatel' soprotivleniya rezistivnogo datchika v otnoshenie dvukh napryazhenii (Resistive sensor resistance transducer in the ratio of two voltages)/ Kutluyarov G.Kh. Publ.: 1981.

12. USSR author's certificate № 1035210. IPC G 01 K 27/02. Ustroistvo dlya izmereniya temperatury v skvazhinakh (Well temperature measuring device) / Kutluyarov G.Kh., Kolovertnov Yu.D., Zhevak B.C., Damrin E.S., Molchanov A.A., Chernyi V.B. Opubl. v B.I. Publ.: 1983.

13. USSR author's certificate № 957116. IPC G 01 K 17/2. Preobrazovatel' soprotivleniya datchikov glubinnykh parametrov (Downhole sensors transducer) / Kutluyarov G.Kh., Kolovertnov Yu.D., Zhevak B.C., Damrin E.S., Molchanov A.A., Chernyi B.V. Publ.: 1982.

14. USSR author's certificate № 1164627. IPC G 01 R 27/2. Mnogotochechnyi preobrazovatel' soprotivleniya rezistivnykh datchikov (Resistive sensors resistance multipoint transducer). Kutluyarov G.Kh., Kolovertnov Yu.D., Zhevak B.C., Damrin E.S., Molchanov A.A. Publ.: 1985.

15. USSR author's certificate № 1298515. IPC G 01 R 27/2. Preobrazovatel' soprotivleniya rezistivnykh datchikov (Resistive sensors resistance transducer). Kutluyarov G.Kh. Publ.: 1987.