DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-3-151-158
УДК 681.2

А.Н. Краснов (Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СОВОКУПНЫХ И СОВМЕСТНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Andrey N. Krasnov (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa,
Russian Federation)

ANALYSIS OF A TWO-CHANNEL SYSTEM FOR PRESSURE AND TEMPERATURE MEASUREMENT BASED ON COMPREHENSIVE AND JOINT MEASUREMENTS METHODS

Введение

Возможность обработки измерительной информации в реальном масштабе времени, а также стремительное развитие средств вычислительной техники открывают новые возможности применения и развития совокупных и совместных методов измерений.

Известны технические решения для измерения давления и температуры на основе мостового тензорезистивного датчика структуры КНС. В них реализовано измерение напряжений на измерительной диагонали и диагонали питания при питании мостовой схемы от источника тока. Определение давления и температуры осуществляется расчетным путем, как правило, на основе численных методов. Тензорезистивные датчики выпускаются различных типов, и каждый тип описывается своей математической моделью.

Цели и задачи

В статье рассматриваются методика исследования и разработки двухканальных информационно-измерительных систем, линейные математические модели, используемые для исследования принципиальной измеряемости двухканальных систем измерения давления и температуры.

Background

The ability to process real-time measurement information, as well as the rapid development of computer facilities, opens new possibilities for the application and development of combined and joint measurement methods.

There are known technical solutions for measuring pressure and temperature on the basis of a bridge strain-resistive sensor of the structure of the SOI. They realize the measurement of voltages on the measuring diagonal and the diagonal of the supply when the bridge circuit is powered by a current source. The determination of pressure and temperature is carried out by calculation, usually based on numerical methods. Tensoresistance sensors are available in various types, and each type is described by its mathematical model.

Aims and Objectives

The technique of research and development of two-channel information-measuring systems, linear mathematical models used for the study of the principle measurement of two-channel pressure and temperature measurement systems are considered in the article.

Общее условие измеряемости равносильно разрешимости системы уравнений, описывающих измерительные каналы. Реализация одного измерительного канала производится путем использования различных элементов и различных схем включения. При этом модели записываются в виде уравнений преобразования сопротивлений тензомоста в напряжение при питании током. Возможные варианты определяются путем перебора. Всего выявлен двадцать один возможный вариант реализации двухканальной системы измерения давления и температуры.

Результаты

Исследование измеряемости всех вариантов двухканальных систем позволило установить, что девятнадцать вариантов отвечают условию измеряемости, а два нет.

Предложена математическая модель, которая может быть использована для определения оптимального варианта двухканальной измерительной системы по критерию минимума числа обусловленности.

The general condition of measurability is equivalent to the solvability of the system of equations describing the measuring channels. The implementation of one measuring channel is made by using different elements and different switching circuits. In this case, the models are written in the form of equations for the transformation of resistance of the strain gage into a voltage when the current is supplied. Possible variants are determined by search. In total, twenty-one possible versions of the implementation of a two-channel pressure and temperature measurement system have been identified.

Results

A study of the measurability of all variants of two-channel systems made it possible to establish that nineteen variants meet the condition of measurability, and two do not.

A mathematical model is proposed that can be used to determine the optimal variant of a two-channel measuring system by the criterion of the minimum of the conditioning number.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, измерительный канал, датчик, измеряемость, математическая модель

Key words: information-measuring system, measuring channel, sensor, measurability, mathematical model

Общую структуру всех двухканальных информационно-измерительных систем (ИИС) можно представить в виде следующей структурной схемы (рисунок 1).

В основе этой структуры лежит использование двух способов получения информации, приведенных на рисунке 1, с последующей математической обработкой [1].

Аналитическое описание данной структуры в общем виде представлено ниже:

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x_1, x_2, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3); \\ y_2 = f_2(x_1, x_2, \alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3), \end{cases} \quad (1)$$

где x_1, x_2 - измеряемые параметры;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - коэффициенты чувствительности к каждому измеряемому параметру в первом канале измерения;

$\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3$ - коэффициенты чувствительности к каждому измеряемому параметру во втором канале измерения.

В результате решения данной системы численными либо аналитическими способами получают коды N_1, N_2 :

$$\begin{cases} x_1 = \psi_1(y_1, y_2); \\ x_2 = \psi_2(y_1, y_2). \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотренная структура является общей и может служить отправной точкой при исследовании и разработке как конкретного варианта, так и различных вариантов одного класса.

Предлагаемая методика исследования и разработки двухканальных систем представлена на рисунке 2.

x_1, x_2 - измеряемые параметры;
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - параметры первого КИ;
 $\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3$ - параметры второго КИ;
 КИ - каналы измерения;
 ПК - персональный компьютер;
 f_1, f_2 - выходные сигналы первого и второго канала измерения;
 N_1, N_2 - коды x_1, x_2

Рисунок 1. Общая структура двухканальных методов измерения состава

Рисунок 2. Методика исследования двухканальных систем

Данная методика является логически последовательной и позволяет:

- выявить все возможные варианты двухканальных систем;
- определить варианты, удовлетворяющие условиям измеряемости и физической реализуемости;
- выявить оптимальные варианты для различных диапазонов изменения измеряемых величин.

Тензорезистивные датчики выпускаются различных типов, и каждый тип описывается своей математической моделью. Для определенности в данной работе рассматриваются тензодатчики структуры КНС. Эти датчики серийно выпускаются в виде мостовой или полумостовой схем (рисунок 3), состоящих из двух базовых элементов, один из которых $R_1^+(P, T)$ увеличивает свое сопротивление под действием деформации чувствительного элемента, а другой $R^-(P, T)$ - уменьшает. А при возрастании температуры сопротивление обоих базовых элементов возрастает [2]. Предположим, что противоположные элементы идентичны.

Выбор вида математической модели тензодатчиков зависит от задачи, для которой она предназначена. Так, для выбора оптимальных вариантов двухканальных систем необходима более адекватная модель, определяемая экспериментально. А для определения возможных вариантов каналов измерения (КИ) и двухканальных систем, а

также исследования принципиальной измеряемости достаточно линейная аналитическая модель [3].

Линейная аналитическая модель базовых элементов для решения этих вопросов может быть представлена в виде:

$$R_1^+(P, T) = R_0 + \Delta R(P) + \Delta R(T); \quad (3)$$

$$R_2^-(P, T) = R_0 - \Delta R(P) + \Delta R(T), \quad (4)$$

где R_0 - сопротивление тензорезистора при температуре 0°C и атмосферном давлении;

$\Delta R(P)$ - приращение сопротивления тензорезистора от изменения давления;

$\Delta R(T)$ - приращение сопротивления тензорезистора от изменения температуры.

Реализация одного измерительного канала производится путем использования различных элементов и различным схем включения. При этом модели будут записаны в виде преобразования сопротивлений тензомоста в напряжение при питании током. Возможные варианты определяются путем перебора, всего физически реализуемо семь схем включения.

Для измерения давления и температуры одним датчиком необходимо реализовать в ИИС минимум два измерительных канала, описываемых системой уравнений (1). Тогда общее число сочетаний двух измерительных каналов из семи равно:

$$C_7^2 = \frac{7!}{2!(7-2)!} = 21. \quad (5)$$

Рисунок 3. Мостовая и полумостовая схемы серийно выпускаемых тензодатчиков структуры КНС

Таким образом, на основе семи измерительных каналов может быть реализован 21 вариант двухканальных измерительных систем. Возникает вопрос: все ли варианты физически реализуемы, т.е. отвечают ли условиям измеряемости. Общее условие измеряемости равносильно разрешимости системы уравнений, описывающих измерительные каналы [4]. Если измерительные каналы описываются уравнениями:

$$y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n), i = (1, n), \quad (6)$$

тогда условием разрешимости этой системы является неравенство нулю функционального определителя (якобиана)

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial y_n}{\partial x_1} & \frac{\partial y_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_n}{\partial x_n} \end{vmatrix} \neq 0. \quad (7)$$

Применительно к двухканальной системе измерения давления и температуры это условие запишется в виде

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial U_i}{\partial(\Delta R(P))} & \frac{\partial U_i}{\partial(\Delta R(T))} \\ \frac{\partial U_j}{\partial(\Delta R(P))} & \frac{\partial U_j}{\partial(\Delta R(T))} \end{vmatrix} \neq 0. \quad (8)$$

Выражения для частных производных напряжения $U_{i(j)}$ являются громоздкими. Для их упрощения использовалось предположение, что $R_0 \gg \Delta R(T)$, что не нарушает справедливость дальнейших исследований.

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial(\Delta R(P))} &= \frac{\Delta R(P)}{R_0} = a; \\ \frac{\partial U_j}{\partial(\Delta R(T))} &= 1 - \frac{\Delta R(T)}{R_0} = b. \end{aligned} \quad (9)$$

$a \neq b.$

Аналогичным образом были исследованы остальные 20 двухканальных систем измерения давления и температуры. Результаты исследований всех вариантов двухканальных систем измерения давления и температуры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследований функциональных матриц различных вариантов сочетаний реализаций ИК

Вариант сочетания ИК	Уравнения преобразования	Функциональная матрица	Значение определителя
1,2	$U_1 = I(R^+(P, T)).$ $U_2 = I(R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix}$	2
1,3	$U_1 = I(R^+(P, T)).$ $U_3 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix}$	2
1,4	$U_1 = I(R^+(P, T)).$ $U_4 = I(R^+(P, T) - R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix}$	2
1,5	$U_1 = I(R^+(P, T)).$ $U_5 = I(R^+(P, T) * R^-(P, T)) / (R^+(P, T) + R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ a & b \end{vmatrix}$	$b - a$
1,6	$U_1 = I(R^+(P, T)).$ $U_6 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)) / 2.$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$	1
1,7	$U_1 = I(R^+(P, T)).$ $U_7 = I\left(\frac{R^+(P, T)}{R^+(P, T) + R^-(P, T)} - \frac{R^-(P, T)}{R^-(P, T) + R^+(P, T)}\right)$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{R_0} & 1 \end{vmatrix}$	$1 - \frac{1}{R_0}$

Продолжение таблицы 1

2,3	$U_2 = I(R^-(P, T)).$ $U_3 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix}$	-2
2,4	$U_2 = I(R^-(P, T)).$ $U_4 = I(R^+(P, T) - R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 2 & 0 \end{vmatrix}$	-2
2,5	$U_2 = I(R^-(P, T)).$ $U_5 = I(R^+(P, T) * R^-(P, T)) / (R^+(P, T) + R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} -1 & 1 \\ a & b \end{vmatrix}$	$-(b + a)$
2,6	$U_2 = I(R^-(P, T)).$ $U_6 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)) / 2.$	$\begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$	-1
2,7	$U_2 = I(R^-(P, T))$ $U_7 = I\left(\frac{R^+(P, T)}{R^+(P, T) + R^-(P, T)} - \frac{R^-(P, T)}{R^-(P, T) + R^+(P, T)}\right)$	$\begin{vmatrix} -1 & 1 \\ \frac{1}{R_0} & 1 \end{vmatrix}$	$-\left(1 + \frac{1}{R_0}\right)$
3,4	$U_3 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)).$ $U_4 = I(R^+(P, T) - R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 0 \end{vmatrix}$	-4
3,5	$U_3 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)).$ $U_5 = I(R^+(P, T) * R^-(P, T)) / (R^+(P, T) + R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} 0 & 2 \\ a & b \end{vmatrix}$	$-2a$
3,6	$U_3 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)).$ $U_6 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)) / 2.$	$\begin{vmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$	0
3,7	$U_3 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)).$ $U_7 = I\left(\frac{R^+(P, T)}{R^+(P, T) + R^-(P, T)} - \frac{R^-(P, T)}{R^-(P, T) + R^+(P, T)}\right)$	$\begin{vmatrix} 0 & 2 \\ \frac{1}{R_0} & 1 \end{vmatrix}$	$-\frac{2}{R_0}$
4,5	$U_4 = I(R^+(P, T) - R^-(P, T)).$ $U_5 = I(R^+(P, T) * R^-(P, T)) / (R^+(P, T) + R^-(P, T)).$	$\begin{vmatrix} 0 & 2 \\ a & b \end{vmatrix}$	$-2a$
4,6	$U_4 = I(R^+(P, T) - R^-(P, T)).$ $U_6 = I(R^+(P, T) - R^-(P, T)) / 2.$	$\begin{vmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$	2
4,7	$U_4 = I(R^+(P, T) - R^-(P, T)).$ $U_7 = I\left(\frac{R^+(P, T)}{R^+(P, T) + R^-(P, T)} - \frac{R^-(P, T)}{R^-(P, T) + R^+(P, T)}\right)$	$\begin{vmatrix} 2 & 0 \\ \frac{1}{R_0} & 0 \end{vmatrix}$	0
5,6	$U_5 = I(R^+(P, T) * R^-(P, T)) / (R^+(P, T) + R^-(P, T)).$ $U_6 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)) / 2.$	$\begin{vmatrix} a & b \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$	a
5,7	$U_5 = I(R^+(P, T) * R^-(P, T)) / (R^+(P, T) + R^-(P, T)).$ $U_7 = I\left(\frac{R^+(P, T)}{R^+(P, T) + R^-(P, T)} - \frac{R^-(P, T)}{R^-(P, T) + R^+(P, T)}\right)$	$\begin{vmatrix} a & b \\ \frac{1}{R_0} & 0 \end{vmatrix}$	$-\frac{b}{R_0}$
6,7	$U_6 = I(R^+(P, T) + R^-(P, T)) / 2.$ $U_7 = I\left(\frac{R^+(P, T)}{R^+(P, T) + R^-(P, T)} - \frac{R^-(P, T)}{R^-(P, T) + R^+(P, T)}\right)$	$\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{R_0} & 0 \end{vmatrix}$	$-\frac{1}{R_0}$

Как было указано выше, линейные модели используются для исследования принципиальной измеряемости двухканальных систем измерения давления и температуры.

Для выбора оптимальных вариантов схем включения необходима модель, обеспечивающая наименьшее среднеквадратическое отклонение, и в то же время с наименьшим числом параметров.

Для решения этой задачи были проведены экспериментальные исследования серии базовых элементов тензодатчиков, выполненных по сетке в диапазонах температуры до 300 °С (с шагом 50 °С) и давлении до 6 МПа (с шагом 0,1 МПа) в программном пакете «STATISTIKA 6». Были проанализированы более 90 различных моделирующих функций с целью выбора оптимального варианта. При анализе различных моделирующих функций были исключены коэффициенты, не удовлетворяющие критерию Фишера (условие значимости коэффициентов) [5].

Исследования показали, что функцией, описывающей ИК, наиболее адекватно, является функция, представляющая полином второго порядка, вида

$$a + b * x_1 + c * x_2 + d * x_1^2 + e * x_2^2 + f * x_1 * x_2, \quad (10)$$

где x_1 - представляет собой давление;

x_2 - представляет собой температуру;

a, b, c, d, e, f - коэффициенты аппроксимирующего полинома.

Следует отметить, что увеличение степени полинома, например использование полинома третьей степени, не приводит к увеличению точности аппроксимации экспериментальных данных.

Выводы

Предложена методика исследования двухканальной системы измерения давления и температуры на основе тензометрического датчика, включающая:

- моделирование характеристик тензодатчика;
- определение возможных схем реализации одного канала;
- схемная реализация двухканальных систем;
- исследование измеряемости двухканальных систем;
- выбор оптимальных вариантов.

Определены возможные схемы реализации одного измерительного канала. Всего выявлено семь вариантов, пять из которых реализуются на основе полумостовой схемы, а два на основе мостовой схемы. Исследование измеряемости всех вариантов сочетаний реализаций ИК двухканальных систем позволило установить, что девятнадцать вариантов отвечают условию измеряемости, а два нет.

Предложена математическая модель, которая может быть использована для определения оптимального варианта двухканальной измерительной системы по критерию минимума числа обусловленности.

Список литературы

1. Ишинбаев Н.А. Измерительные системы с неселективными датчиками // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 8. С. 44-46.
2. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
3. Лялин В.Е., Краснов А.Н. Дистанционное измерение давления и температуры в скважине одним датчиком по четырехпроводной линии связи // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2016. № 2 (70). С. 83-86.
4. Yamasaki H. Intelligent Sensors: Handbook of Sensors and Actuators. Elsevier Science. 1996. Vol. 3. 308 p.

References

1. Ishinbaev N.A. Izmeritel'nye sistemy s neselektivnymi datchikami [Measuring Systems with Non-Selective Sensors]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika - Devices and systems. Management, Monitoring, Diagnostics*, 2004, No. 8, pp. 44-46. [in Russian].
2. Vaganov V.I. *Integral'nye tenzopreobrazovateli* [Integral Strain Gauges]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 136 p. [in Russian].
3. Lyalin V.E., Krasnov A.N. Distantionnoe izmerenie davleniya i temperatury v skvazhine odnim datchikom po chetyrehprovodnoi linii svyazi [Remote Measurement of Pressure and Temperature in the Well by One Sensor over a Four-Wire Communi-

5. Gentle J.E. Matrix Algebra: Theory, Computations, and Applications in Statistics. Springer Publishing Company Incorporated, 2007. 530 p.

cation Line]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova - Bulletin of Kalashnikov ISTU*, 2016, No. 2 (70), pp. 83-86. [in Russian].

4. Yamasaki H. *Intelligent Sensors: Handbook of Sensors and Actuators*. Elsevier Science, 1996. Vol. 3. 308 p.

5. Gentle J.E. Matrix Algebra: Theory, Computations, and Applications in Statistics. Springer Publishing Company, Incorporated. 2007. 530 p.

Автор

• Краснов Андрей Николаевич, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Автоматизация
технологических процессов и производств»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: ufa-znanie@mail.ru

The Author

• Krasnov Andrey N., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Automation of Technological
Processes and Productions Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: ufa-znanie@mail.ru