

УДК 53.088.228

В.А. Сергеев, А.В. Беринцев

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ПРИРОДЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ДАТЧИКОВ¹

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил физический факультет Горьковского государственного университета. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Имеет монографии, статьи и изобретения в области моделирования и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Беринцев Алексей Валентинович, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета. Инженер 1 категории Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета. Имеет научные публикации и изобретения в области автоматизации измерений и исследования оптоэлектронных приборов. [e-mail: ilya-frolov88@mail.ru].

Аннотация

Рассмотрены основные источники погрешностей преобразователей с дифференциальным включением датчиков, обусловленные различием тепловых режимов работы их чувствительных элементов. Получены выражения для разности температуры чувствительных элементов в статическом и динамическом режимах работы, обусловленных как различием тепловых параметров датчиков, так и различием мощности, рассеиваемой датчиками.

Показано, что при ступенчатом включении преобразователя с различными тепловыми постоянными времени датчиков погрешность тепловой природы достигает максимума в некоторый момент времени, зависящий от отношения тепловых постоянных времени, и может существенно превышать погрешность в стационарном режиме.

На основе полученных выражений проведены оценки погрешностей дифференциального фотодиода и показано, что погрешность тепловой природы имеет мультипликативный характер и зависит от размеров светового пятна. Для преобразователей мостового типа температурный дрейф нуля пропорционален разности тепловых сопротивлений чувствительных элементов, причем чем больше суммарное тепловое сопротивление датчиков, тем больше величина температурного разбаланса.

Ключевые слова: дифференциальный преобразователь, чувствительные элементы, тепловой режим, разность температур, погрешности тепловой природы.

ERROR ESTIMATION OF THERMAL CONDITIONS OF MEASUREMENT TRANSDUSERS WITH DIFFERENTIAL CONNECTION OF SENSORS

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Physics at Gorky State Technical University; Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of monographs, articles, and inventions in the field of the modeling, research and thermal conditions measuring of semiconductor devices and integrated circuits parameters. e-mail: sva@ulstu.ru.

Aleksei Valentinovich Berintsev, graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Specialist at S.P.Kapitsa Technological Institute of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles and inventions in the field of computer-aided measurement and optoelectronic devices research. e-mail: ilya-frolov88@mail.ru.

Abstract

The main sources of errors of transducers with sensors differential connections caused by the distinction of thermal conditions of the sensing elements work are considered. Expressions for the distinction of sensors temperature in static and dynamic modes of operation caused by both the distinction of sensors parameters heat and the power dissipated by sensors are obtained.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания №2014/232 Минобрнауки РФ.

It is shown that instant at grading of the converter with various thermal time constants of sensors the thermal nature error reaches a maximum at a particular instant depending on the relation of thermal time constants. The thermal nature error can also significantly exceed the error in steady conditions.

Errors of the differential photodiode are estimated on the basis of obtained expressions, and it is shown that the error of thermal conditions has multiplicative character and depends on the sizes of a light spot. For converters of bridge type the zero temperature drift is proportional to a difference of sensing devices thermal resistance. The more the total thermal resistance of sensors is the more, the more the size of temperature imbalance is.

Key words: differential transducer, sensors, thermal conditions, temperature difference, errors of thermal conditions.

ВВЕДЕНИЕ

Измерительные преобразователи с дифференциальным соединением датчиков или просто дифференциальные преобразователи (ДП) находят весьма широкое применение в современных системах управления [1, 2]. Согласно принципу работы ДП, оба канала ДП должны быть одинаковыми и находиться в одинаковых внешних рабочих условиях.

Анализ погрешностей тепловой природы дифференциальных измерительных преобразователей проведен в [3]. Общие формулы, полученные в [3] для разности температур датчиков в различных режимах их работы, сложно использовать для оценки погрешностей конкретных схем преобразователей. В данной работе результаты общего анализа рассмотрены применительно к конкретным вариантам ДП.

Общая структурная схема ДП показана на рисунке 1. Входные физические величины x_1 и x_2 воздействуют на первый и второй датчики соответственно. Функции преобразования датчиков определяются соответственно выражениями:

$$y_1 = f_1(x_1), \quad (1a)$$

$$y_2 = f_2(x_2), \quad (1b)$$

и зависят как от конструктивно-топологических параметров датчиков, так и от параметров воздействия внешней среды, например, температуры. Выходная величина ДП y является некоторой, как правило, линейной функцией разности выходных физических величин y_1 и y_2 датчиков:

$$y = S \cdot (y_1 - y_2), \quad (2)$$

где S – чувствительность вычитающего преобразователя.

В ДП с опорным каналом (или плечом) на один из датчиков (например, второй) действует опорная физическая величина, имеющая заданное значение:

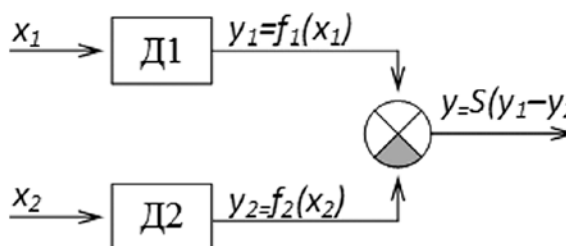


Рис. 1. Структурная схема ДП

$$x_2 = x_0, \quad (3a)$$

а на другой (соответственно, первый) датчик воздействует измеряемая физическая величина x_1 , которую для удобства последующих преобразований запишем в виде:

$$x_1 = x_0 + x. \quad (3b)$$

В ДП с балансным включением датчиков измеряемая физическая величина воздействует на оба датчика, но с противоположными знаками, то есть

$$x_1 = x_0 + x, \quad (4a)$$

$$x_2 = x_0 - x. \quad (4b)$$

где x_0 – значение физической величины, воздействующей на оба датчика в отсутствии измеряемого воздействия, причем зачастую $x_0 = 0$.

Идентичность или близость с заданной точностью статических функций преобразования датчиков и каналов ДП обеспечивают путем подбора и различных видов коррекции. В частности, применяя методы температурной коррекции, можно обеспечить равенство статических функций преобразования в заданном диапазоне рабочих температур.

1 ОБЩИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДП

Однако, как показывает анализ практического применения ДП, гораздо сложнее на практике обеспечить одинаковость тепловых режимов работы датчиков. Укажем некоторые причины этого:

- тепловые параметры датчиков зачастую трудно поддаются измерению и, как правило, не измеряются;
- тепловой режим датчиков определяется условиями теплоотвода и в первую очередь видом и качеством тепловых контактов датчиков с другими элементами конструкции ДП, контролировать которые в процессе эксплуатации достаточно сложно;
- теплофизические параметры материалов датчиков и элементов конструкции ДП зависят от большого числа факторов, воздействующих на ДП в процессе эксплуатации;
- мощности, рассеиваемые датчиками в результате физических процессов преобразования воздействующих величин, в общем случае различны.

При выравнивании статических температурных режимов датчиков в реальных условиях неизбежно возникают переходные тепловые процессы из-за изменения, например, температуры окружающей среды.

Указанные выше причины приводят к тому, что температуры T_1 и T_2 активных областей первого и второго датчиков, соответственно, в общем случае будут различны. Это приводит к появлению дополнительных составляющих погрешности ДП тепловой природы Δy , анализ которых для ДП с нелинейными функциями преобразования представляет как теоретический, так и практический интерес.

В [3] показано, что в случае ДП с опорным плечом погрешность тепловой природы – это чисто аддитивная погрешность:

$$\Delta y_{оп} = S \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial^k f}{\partial T^k} (\Delta T_1^k - \Delta T_2^k), \quad (5)$$

определяемая частными производными функции преобразования только по температуре.

Если ограничиться в (5) двумя членами ряда, то

$$\Delta y_{оп} = S \left[\frac{\partial f}{\partial T} + \frac{\partial^2 f}{\partial T^2} (\Delta T_1 + \Delta T_2) \right] (\Delta T_1 - \Delta T_2), \quad (6)$$

то есть погрешность практически линейно зависит от разности температур.

В случае балансного ДП температурная составляющая погрешности содержит как аддитивную, так и мультипликативную составляющие:

$$\begin{aligned} \Delta y_{БП} = S \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\partial^m f}{\partial T^m} \cdot [(\Delta T_1^m - \Delta T_2^m)] + \\ + \sum_{m=2}^{\infty} \sum_{k=1}^m \frac{\partial^m f}{\partial x^{2k} \partial T^{m-2k}} \cdot x^{2k} (\Delta T_1^{m-2k} - \Delta T_2^{m-2k}) = \end{aligned} \quad (7)$$

$$= \Delta y_{БП}^A + \Delta y_{БП}^M,$$

причем аддитивная составляющая $\Delta y_{БП}^A$ совпадает с аналогичной погрешностью ДП с опорным плечом.

Мультипликативная составляющая определяется смешанными частными производными и содержит только четные степени по x . Если ограничиться первыми двумя членами ряда для мультипликативной составляющей, получим:

$$\Delta y_{БП}^M = S \cdot x^2 \cdot \left[\frac{\partial^3 f}{\partial x^2 \partial T} + \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial T^2} (\Delta T_1 + \Delta T_2) \right] \times (\Delta T_1 - \Delta T_2), \quad (8)$$

то есть также линейно зависит от разности температур.

В общем случае погрешность данного вида у балансного ДП больше, чем у ДП с опорным плечом.

В качестве общих рекомендаций по уменьшению рассмотренных выше погрешностей можно предложить выбирать режим работы датчиков (рабочую точку – (x_0, T_0)) из условия минимизации сомножителей в квадратных скобках в (6) и (8):

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial T} + \frac{\partial^2 f}{\partial T^2} (\Delta T_1 + \Delta T_2) \rightarrow \min; \\ \frac{\partial^3 f}{\partial x^2 \partial T} + \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial T^2} (\Delta T_1 + \Delta T_2) \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (9)$$

Для оценки этих составляющих погрешностей необходимо, во-первых, иметь достаточно полную информацию

о температурных характеристиках датчиков, чтобы рассчитать или оценить значения частных производных в рабочем диапазоне измеряемых величин и температур. Во-вторых, необходимо иметь методики оценки возможной разности температур для конкретных типов датчиков в реальных условиях эксплуатации. Рассмотрим некоторые подходы к оценке разности температур датчиков $\Delta T_{12} = \Delta T_1 - \Delta T_2$.

Статический режим 1. При идентичных условиях теплоотвода и равенстве тепловых сопротивлений датчиков

$R_{T1} = R_{T2} = R_T$ разность температур будет обусловлена разностью рассеиваемых мощностей:

$$\Delta T_{12} = R_T (P_1 - P_2). \quad (10)$$

Не вдаваясь в физику процессов преобразования в датчике, можно без ограничения общности предположить, что мощность, выделяющаяся в датчике в виде тепла, является некоторой функцией преобразуемой физической величины $P_i = \Psi(x_i)$.

Представим $\Psi(x_i)$ в виде ряда вблизи окрестности точки x_0 и ограничимся в разложении членами второго порядка:

$$\Psi(x_i) = \Psi(x_0) + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x_0} \cdot \Delta x_i + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \Big|_{x_0} \cdot (\Delta x_i)^2. \quad (11)$$

Для ДП с опорным плечом ($\Delta x_1 = x$, $\Delta x_2 = 0$) получим:

$$\Delta P_{оп} = P_1 - P_2 = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot x + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \cdot x^2. \quad (12)$$

Для балансного ДП соответственно ($\Delta x_1 = x$, $\Delta x_2 = -x$) и

$$\Delta P_{БП} = 2 \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot x. \quad (13)$$

2. При равенстве рассеиваемых мощностей $P_1 = P_2 = P$ разность температур будет обусловлена различием тепловых сопротивлений датчиков:

$$\Delta T_{12} = (R_{T1} - R_{T2}) \cdot P. \quad (14)$$

3. В общем случае разность температур датчиков будет определяться как разностью тепловых сопротивлений, так и разностью мощностей, преобразуемых в тепло датчиками преобразователя:

$$\Delta T_{12} = P_1 R_{T1} - P_2 R_{T2}. \quad (15)$$

Во многих вариантах преобразователей (дифференциальный каскад, резистивные мосты постоянного тока, диодные мостовые преобразователи и т. д. [4, 5]) полная мощность, рассеиваемая преобразователем, остается примерно постоянной $P_1 + P_2 = P_0 \approx const$, а мощности, рассеиваемые датчиками, зависят только от разности температур:

$$P_1 = \frac{P}{2} (1 + \xi \Delta T_{12}) = P_2 = \frac{P}{2} (1 - \xi \Delta T_{12}), \quad (16)$$

где ξ – температурный коэффициент мощности. В этом случае из (15) нетрудно получить следующее выражение для разности температур датчиков:

$$\Delta T_{12} = \frac{P_0 (R_{T1} - R_{T2})}{2 \left[1 - \xi \frac{P}{2} (R_{T1} + R_{T2}) \right]}. \quad (17)$$

Следует отметить, что разность температур датчиков не только линейно зависит от разности тепловых сопротивлений, но и растет с ростом полного теплового сопротивления.

Динамический режим 1. При изменении измеряемой или опорной физической величины (например, при подаче сигнала на датчики) будет изменяться рассеиваемая датчиками мощность и собственно их температурный режим. Рассмотрим по аналогии с [3–5] однозвенную теплоэлектрическую модель системы из двух датчиков (рис. 2).

При подаче на датчики ступенек одинаковой мощности P изменение разности температур будет описываться выражением

$$\Delta T_{12} = P \left[R_{T1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T1}}} \right) - R_{T2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T2}}} \right) \right], \quad (18)$$

где $\tau_{Ti} = R_{Ti} C_{Ti}$ – тепловая постоянная времени i -го датчика, C_{Ti} – теплоемкость i -го датчика.

В [3] показано, что при некоторых соотношениях параметров $\{R_{Ti}, C_{Ti}\}$ функция $\Delta T_{12}(t)$ имеет максимум ΔT_{12}^{max} в момент времени

$$t_{max} = \frac{\tau_{T1} \tau_{T2}}{\tau_{T1} - \tau_{T2}} \cdot \ln \frac{C_{T1}}{C_{T2}}. \quad (19)$$

Условие наличия максимума очевидно: $t_{max} > 0$. Из анализа (19) можно видеть, что $t_{max} = 0$ при $C_{T1} = C_{T2}$. Заметим, что максимум разности температур может наблюдаться, как показано на рисунке 3, при равенстве тепловых сопротивлений датчиков, то есть даже при статической погрешности, равной нулю.

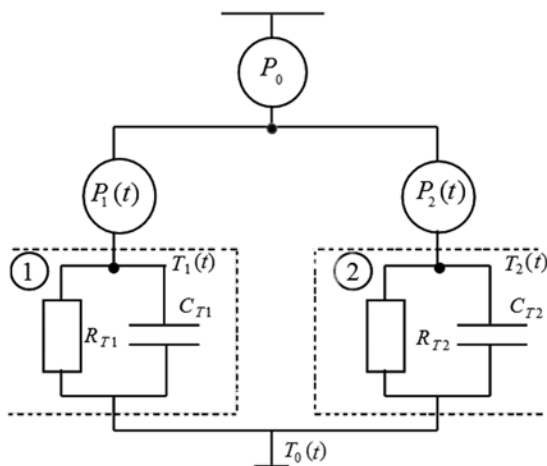


Рис. 2. Тепловая модель преобразователя с дифференциально включенными датчиками

Рассмотрим кинетику разогрева датчиков для случая температурозависимой мощности, рассеиваемой датчиками, при условии постоянства полной мощности, рассеиваемой преобразователем:

$$\Delta T_{12} = P_1(t) R_{T1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T1}}} \right) - P_2(t) R_{T2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T2}}} \right), \quad (20)$$

где мощности, поглощаемые датчиками:

$$P_1(t) = \frac{P_0}{2} (1 + \xi \Delta T_{12}(t));$$

$$P_2(t) = \frac{P_0}{2} (1 - \xi \Delta T_{12}(t)).$$

Кинетика изменения разности температур датчиков в этом случае будет описываться более сложной формулой:

$$\Delta T_{12} = \frac{P_0 \left[R_{T1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T1}}} \right) - R_{T2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T2}}} \right) \right]}{2 \left[1 - \frac{\xi P_0}{2} \left(R_{T1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T1}}} \right) + R_{T2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T2}}} \right) \right) \right]}. \quad (21)$$

Согласно (21) разность температур будет достигать максимума в момент времени t_{max} , определяемый выражением (19), но значение максимума может существенно превышать ΔT_{12}^{max} :

$$\Delta \tilde{T}_{12}^{max} = \frac{\Delta T_{12}^{max}}{1 - \frac{\xi}{2} \Delta \bar{T}(t_{max})}, \quad (22)$$

где $\Delta \bar{T}(t_{max})$ – средняя температура датчиков в момент времени t_{max} .

2. При выключении мощности температура датчиков будет уменьшаться, кривая остывания в рассмотренной модели подобна кривой нагрева и при этом также будет

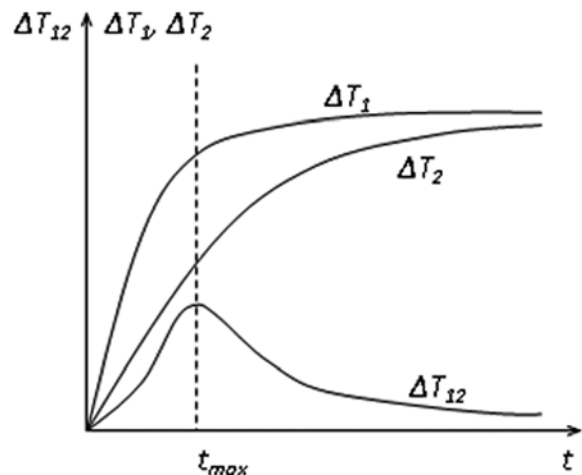


Рис. 3. Кинетика изменения (схематично) температур датчиков и их разности при подаче ступеньки греющей мощности (включении преобразователя)

наблюдаться максимум разности температур через время t_{max} после выключения. Динамическая разность температур при равенстве тепловых сопротивлений обусловлена разностью теплоемкостей, что необходимо учитывать при монтаже датчиков в ДП. В качестве оценки ΔT_{12} необходимо брать значение $\Delta \tilde{T}_{12}^{max}$, которое получается из (22) после подстановки значения t_{max} .

В предельном случае $P_{1,2} \rightarrow 0$ оба датчика в стационарном режиме должны иметь одинаковую температуру, равную температуре окружающей среды. Однако при изменении температуры окружающей среды температуры датчиков будут изменяться, но в силу инерционности тепловых процессов не могут мгновенно достигнуть равновесного значения.

В общем случае, зная допустимый технологический разброс тепловых параметров датчиков и возможный перепад температуры окружающей среды в реальных условиях измерения, можно оценить максимальную динамическую погрешность ДП, обусловленную разностью температур датчиков.

2 ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ТЕПЛОЙ ПРИРОДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ФОТОПРИЕМНИКА

В измерительной технике для регистрации малого смещения светового пятна относительно некоторого равновесного положения широко используются дифференциальные фотоприемники [6], состоящие из двух идентичных фотодиодов (ФД), разделенных небольшим зазором и включенных, как правило, по схеме балансного преобразователя. В исходном равновесном состоянии световое пятно расположено симметрично относительно зазора между ФД и засвечивает обе части фотоприемника одинаковым световым потоком; в этом случае фототоки (или фотоэдс) ФД будут одинаковыми и выходной сигнал преобразователя будет равен нулю. При смещении светового пятна в ту или иную сторону от равновесного положения фототок одного из ФД увеличивается, а другого – уменьшается. Общая мощность, приводящая к разогреву ФД, равна сумме электрической мощности $P_{эл}$, рассеиваемой ФД, и оптической мощности $P_{ом}$ светового пятна, поглощаемой в структуре ФД: $P_i = P_{эл} + P_{ом}$. При этом электрическая мощность, рассеиваемая ФД, пропорциональна квадрату фототока ФД $P_{эл} \sim I_{фд}^2$, который, в свою очередь, пропорционален величине смещения светового пятна x . Мощность светового потока, поглощаемая ФД, пропорциональна площади светового пятна. Поскольку физической величиной, преобразуемой дифференциальным фотоприемником, в этом случае является величина смещения светового пятна, то есть $x_1 = x$, а $x_2 = -x$, то для электрической мощности, рассеиваемой каждой из частей дифференциального фотоприемника, можно записать следующие выражения:

$$P_{эл1} = a(l+x)^2; P_{эл2} = a(l-x)^2, \quad (23)$$

где a – некоторый постоянный коэффициент, определяе-

мый напряжением смещения ФД, $2l$ – характерный размер светового пятна (полоски) в направлении смещения.

Для поглощаемой оптической мощности можно записать:

$$P_{ом1} = b(l+x); P_{ом2} = b(l-x), \quad (24)$$

где b – некоторый постоянный коэффициент, определяемый геометрическими и оптическими характеристиками структуры ФД и оптическими параметрами светового пятна.

Для разности полных мощностей получим:

$$\Delta P_{12} = 2a \cdot l \cdot x + 2b \cdot x \quad (25)$$

и соответственно для разности температур

$$\Delta T_{12} = 2R_T(a \cdot l + b)x, \quad (26)$$

откуда следует, что погрешности, обусловленные разогревом ФД, прямо пропорциональны величине смещения, то есть имеют чисто мультипликативный характер, и зависят от исходных размеров светового пятна. Общей рекомендацией по снижению погрешности является уменьшение размеров светового пятна, что реализуется в фотоприемных линейках.

3 ОЦЕНКА ДРЕЙФА НУЛЯ ТЕПЛОЙ ПРИРОДЫ НА ПРИМЕРЕ МОСТОВОЙ СХЕМЫ

Одним из распространенных вариантов дифференциального включения датчиков являются мостовые схемы. Рассмотрим схему симметричного моста постоянного тока (рис. 4). В качестве датчиков используются резисторы R_1 , R_2 . В верхние плечи мостовой схемы включены прецизионные резисторы заданного номинала R_0 , сопротивление которых будем считать не зависящим от рассеиваемой мощности. В отсутствие саморазогрева и внешних воздействий на датчики мост сбалансирован при заданной температуре в точке максимальной чувствительности $R_1(T_0) = R_2(T_0) = R_0$. При включении источника тока I_0 и отсутствии измеряемой физической величины резисторы будут нагреваться протекающим током, и температура их будет изменяться $R_1 = R_0[1 + \alpha(\bar{T} + \Delta T_{12})]$ и $R_2 = R_0[1 + \alpha(\bar{T} - \Delta T_{12})]$, где α – температурный коэффициент сопротивления резисторов-датчиков.

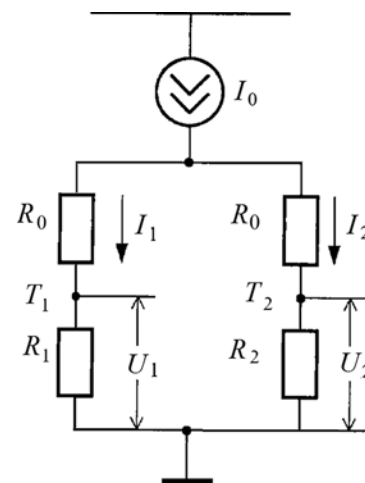


Рис. 4. Схема симметричного моста постоянного тока

В общем случае при небольшой разнице температур резисторов R_1 и R_2 разбаланс тока пропорционален разности температур $\Delta I = \frac{I_0}{2} \beta \Delta T_{12}$ и токи, протекающие по ветвям моста, будут равны $I_1 = \frac{I_0}{2} [1 - \beta \Delta T_{12}]$; $I_2 = \frac{I_0}{2} [1 + \beta \Delta T_{12}]$, где $\beta = \frac{\alpha}{2(1 + \alpha \bar{T}/2)}$.

Учитывая, что резисторы разогреваются джоулевым теплом, для разности температур резисторов можно записать:

$$\Delta T_{12} = \Delta T_1 - \Delta T_2 = \frac{I_1^2}{R_0 [1 + \alpha (\bar{T} + \Delta T_{12})]} R_{T1} - \frac{I_2^2}{R_0 [1 + \alpha (\bar{T} - \Delta T_{12})]} R_{T2}. \quad (27)$$

Для упрощения дальнейшего анализа будем считать, что $\bar{T} \gg \Delta T_{12}$ и

$$R_1 = R_2 \approx R_0 [1 + \alpha \bar{T}] = R. \quad (28)$$

Подставляя (27) в выражение для разбаланса тока с учетом (28), получим уравнение для нахождения величины разбаланса тока:

$$\Delta I = \frac{\beta I_0}{2R} [(I_0 + \Delta I)^2 R_{T1} - (I_0 - \Delta I)^2 R_{T2}]. \quad (29)$$

Решая (29) в линейном приближении относительно ΔI , получим

$$\Delta I = \frac{\beta I_0}{2R} \frac{I_0 (R_{T1} - R_{T2})}{[1 - (2\beta I_0/R)(R_{T1} + R_{T2})]} \quad (30)$$

и, соответственно, разбаланс напряжений на резисторах-датчиках, обусловленный саморазогревом датчиков, в стационарном режиме будет равен:

$$\Delta U = \beta I_0 \frac{I_0 (R_{T1} - R_{T2})}{[1 - (2\beta I_0/R)(R_{T1} + R_{T2})]}. \quad (31)$$

Поскольку падение напряжения на датчиках при уравновешенном мосте $U_0 = I_0 R/2$, то для относительной погрешности разбаланса моста по напряжению (дрейф нуля), обусловленной саморазогревом датчиков, получим следующее выражение:

$$\delta U = \frac{\eta (R_{T1} - R_{T2})}{1 - \eta (R_{T1} + R_{T2})}, \quad (32)$$

где $\eta = (2\beta I_0/R)$.

Очевидно, что дрейф нуля пропорционален разности тепловых сопротивлений. Следует отметить, что из выражения (32) следует также, что чем больше тепловое сопротивление датчиков, тем больше погрешность температурного разбаланса.

Величину разбаланса моста в стационарном режиме можно использовать для оценки разности тепловых сопротивлений элементов моста [7, 8]. Поскольку значения тепловых сопротивлений датчиков неизвестны и измерить их каким-либо способом чаще всего невозможно, то в этом случае можно предложить следующий алгоритм.

Измерив относительный разбаланс напряжений при двух различных токах I_1 и I_2 , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \delta U_1 = \frac{\eta_1 (R_{T1} - R_{T2})}{1 - \eta_1 (R_{T1} + R_{T2})}, \\ \delta U_2 = \frac{\eta_2 (R_{T1} - R_{T2})}{1 - \eta_2 (R_{T1} + R_{T2})}. \end{cases} \quad (33)$$

Полученную систему нетрудно разрешить относительно неизвестной разности тепловых сопротивлений:

$$(R_{T1} - R_{T2}) = \frac{\delta U_1}{\eta_1} \left(1 - \frac{b-1}{b-k} \right), \quad (34)$$

где $b = \delta U_2 / \delta U_1$ и $k = \eta_2 / \eta_1 \approx I_2 / I_1$.

Для проверки полученных соотношений измерялся разбаланс по напряжению резистивного моста с резисторами одного номинала: $R_1(T_0) = R_2(T_0) = R_0 = 100 \text{ Ом}$. Предельная мощность всех резисторов, кроме R_1 , была равна 2 Вт и их температура практически не изменялась вплоть до токов 100 мА. В измерительное плечо включались резисторы R_1 с различной предельной рассеиваемой мощностью. Мост балансировался при полном токе 20 мА, затем ток источника увеличивался до 60 мА и измерялась разность напряжений $\Delta U = U_1 - U_2$. Результаты измерений приведены в таблице.

Таблица

Разбаланс резистивного моста при токе 60 мА

$P_{пред}$, Вт	0,125	0,5	1,0
ΔU , мВ	3,9	3,0	1,4
δU , %	0,65	0,5	0,23

Как видно из таблицы, разбаланс моста увеличивается с уменьшением предельной рассеиваемой мощности, что соответствует выражениям (31) и (32), поскольку тепловые сопротивления резисторов без принудительного охлаждения обратно пропорциональны их предельной рассеиваемой мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Погрешности тепловой природы зависят как от тепловых параметров датчиков, так и от принципа преобразования.

Показано, что при ступенчатом включении преобразователя с различными тепловыми постоянными времени датчиков погрешность тепловой природы достигает максимума в некоторый момент времени, зависящий от отношения тепловых постоянных времени, и может существенно превышать погрешность в стационарном режиме.

На основе полученных выражений проведены оценки погрешностей дифференциального ФД и показано, что погрешность тепловой природы имеет мультипликативный характер и зависит от размеров светового пятна. Для преобразователей мостового типа температурный дрейф нуля пропорционален разности тепловых сопротивлений

чувствительных элементов, причем чем больше суммарное тепловое сопротивление датчиков, тем больше величина температурного разбаланса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волгин Л.И. Основы метрологии, оценка погрешностей результатов измерений, схемотехника измерительных преобразователей: учеб. пособие по курсу «Основы метрологии и электрические измерения». – М. : МГУС, 2001. – 108 с.

2. Измерение электрических и неэлектрических величин: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Евтихий [и др.]; под общ. ред. Н.Н. Евтихьева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

3. Сергеев В.А. Погрешности тепловой природы измерительных преобразователей с дифференциальным включением датчиков // Датчики и системы. – 2003. – № 2. – С. 11–14.

4. Сергеев В.А. Моделирование и анализ тепловых состояний симметричных двухэлементных систем с температурозависимыми источниками энергии // Континуальные логико-алгебраические исчисления и нейроматематика в науке, технике и экономике : тр. международ. конф. / под ред. Л.И. Волгина. – Ульяновск : УлГТУ, 2001. – Т. 3. – С. 124–126.

5. Сергеев В.А. Влияние разброса теплофизических параметров транзисторов на характеристики симметричных транзисторных схем // Радиоэлектроника, Информатика, Управление (Запорожье) – 2001. – Вып. 1. – С. 18–22.

6. Черторийский А.А., Беринцев А.В. Оптический способ измерения деформации кольцевого упругого элемента // Радиоэлектронная техника: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.А. Сергеева. – 2013. – С. 86–92.

7. Пат. 2166764 РФ МПК G01R 17/12, 31/26. Способ измерения теплового сопротивления двухполюсников с известным положительным температурным коэффициентом тока / Сергеев В.А. ; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – № 2000100890/09 ; заявл. 11.01.2000 ; опубл. 10.05.2001, Бюл. № 13.

8. Пат. 2206900 РФ МПК G01R 31/26. Способ измерения теплового сопротивления двухполюсников / Сергеев В.А. ; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – № 2002104181/09 ; заявл. 15.02.2002 ; опубл. 20.06.2003, Бюл. № 17.

REFERENCES

1. Volgin L.I. *Osnovy metrologii, otsenka pogreshnostei rezultatov izmerenii, skhemotekhnika izmeritelnykh preobrazovatelei*. Ucheb. posobie po kursu 'Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniia' [Fundamentals of Metrology, Evaluation of Measurements Uncertainty, Measurement Transducers Circuitry Engineering. Textbook]. Moscow, MGUS Publ., 2001. 108 p.

2. Evtikhiev N.N. et al. *Izmerenie elektricheskikh i neelektricheskikh velichin*. Ucheb. posobie dlia vuzov. pod obshch. red. N.N. Evtikhieva [Electrical and Nonelectrical Measurements. University-and-Colledge Textbook, edited by N.N. Evtikhiev]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 352 p.

3. Sergeev V.A. Pogreshnosti teplovoi prirody izmeritelnykh preobrazovatelei s differentsialnym vklucheniem datchikov [Error of Measurement Transducers with Differential Sensor Connection]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2003, no. 2, pp. 11–14.

4. Sergeev V.A. Modelirovanie i analiz teplovykh sostoianii simmetrichnykh dvukhelementnykh sistem s temperaturozavisimymi istochnikami energii [Modeling and Analysis for the Thermal State of Two-Element Systems with Temperature-Dependent Energy Source]. *Kontinualnye logiko-algebraicheskie ischisleniia i neiromatematika v nauke, tekhnike i ekonomike: tr. mezhdunarod. konf. pod red. L.I. Volgina* [Continual Logical-Algebraic Calculus and Neuromathematics in Science, Engineering, and Economics: Proc. of Int. Conf., edited by L.I. Volgin], Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2001, vol. 3, pp. 124–126.

5. Sergeev V.A. Vliianie razbrosa teplofizicheskikh parametrov tranzistorov na kharakteristiki simmetrichnykh tranzistornykh skhem [Effects the of Thermophysical Transmitter Spread on the Symmetric Transistor System Performance]. *Radioelektronika, Informatika, Upravliniia* (Zaporozhzhia) [Radio Electronics, Computer Science, Control], Zaporozhzhia, 2001, Iss. 1, pp. 18–22.

6. Chertoriyskiy A.A., Berintsev A.V. Opticheskii sposob izmereniia deformatsii koltsevogo uprugogo elementa [Optical Method of Strain Measurement for Ring Resistant Element]. *Radioelektronnaia tekhnika: mezhvuz. sb. nauch. tr. pod red. V.A. Sergeeva* [Radioelectronic Equipment: Interuniversity Proceedings, edited by V.A. Sergeev], 2013, pp. 86–92.

7. Russian Federation Patent 2166764, Int.CL.: G01R 17/12, 31/26. *Sposob izmereniia teplovogo soprotivleniia dvukhpoliusnikov s izvestnym polozhitelnym temperaturnym koeffitsientom toka* [Measurement Method for Thermal Impedance of Single-Terminal Pair with the Known Positive Temperature Curent Index]. Inventor: Sergeev V.A. Applicant and Proprietor: Ulyanovsk State Technical University. Application: 2000100890/09. Date of filing: January 11, 2000. Date of publication: May 10, 2001. Bull. No. 13.

8. Russian Federation Patent 2206900 Int.CL.: G01R 31/26. *Sposob izmereniia teplovogo soprotivleniia dvukhpoliusnikov* [Measurement Method for Thermal Impedance of Single-Terminal Pair]. Inventor: Sergeev V.A. Applicant and Proprietor: Ulyanovsk State Technical University. Application: 2002104181/09. Date of filing: February 15, 2002 ; Date of publication: June 20, 2003. Bull. No. 17.