

МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Аннотация. Представлены результаты исследования схем включения датчика температуры в цепях термокомпенсации прецизионных акселерометров. Исследованы также особенности трех способов подключения регулирующих резисторов в термокомпенсационную цепь: последовательно с датчиком, параллельно ему и в виде комбинации двух способов. Моделированием установлены оптимальные области применения каждого из способов включения регулирующего резистора, а также методика расчета значения номинала регулировочного резистора путем решения уравнения третьей степени.

Ключевые слова: акселерометр, метод компенсации, температурная погрешность, коэффициент преобразования, моделирование, температурный градиент индукции.

Abstract. Results of research of schemes of inclusion of the gauge of temperature in chains of thermoindeemnification precision акселерометров are presented. Features of three ways of connection of regulating resistors in a thermocompensatory chain are investigated also: consistently with the gauge, in parallel it and in the form of a combination of two ways. Model establishes optimum scopes of each of ways of inclusion of the regulating resistor, and also a design procedure of value of face value of the adjusting resistor by the decision of the equation of the third degree.

Keywords: accelerometer, indemnification method, a temperature error, transformation factor, model, a temperature gradient of an induction.

Введение

Известными способами термокомпенсации коэффициента преобразования прецизионных акселерометров является использование в них датчика температуры, выходной сигнал которого служит исходной информацией для построения соответствующих схем. Эти схемы могут быть как составной частью конструкции акселерометра, так и находиться за его пределами [1].

Отсутствие отечественных микроэлектронных датчиков температуры приводит к необходимости использования в термокомпенсирующих цепях датчика из медного провода, достоинствами которого являются простота технологий изготовления и высокая стабильность характеристик. Выбор катушки из медного провода в качестве датчика температуры обусловлен его высокой линейностью и стабильностью.

1 Метод компенсации температурной погрешности

Температурная нестабильность коэффициента преобразования акселерометра определяется, главным образом, температурной нестабильностью индукции в зазоре магнитной системы обратного преобразователя [2]. В соответствии с техническими условиями на примененные в акселерометре постоянные кобальт-самариевые магниты температурный коэффициент индукции составляет в интервале от +20 до +60 °С $-0,01 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, а в интервале от -60 до +20 °С его значение не нормируется, достигая фактических значений $-0,03 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$.

Для компенсации указанных температурных уходов применяется термокомпенсирующая цепь, показанная на фрагменте схемы измерительного канала акселерометра, представленном на рис. 1. Здесь $L1$ представляет собой катушку из медного провода из двух встречно включенных полуобмоток с числом витков 1900 и электрическим сопротивлением не менее 800 Ом.

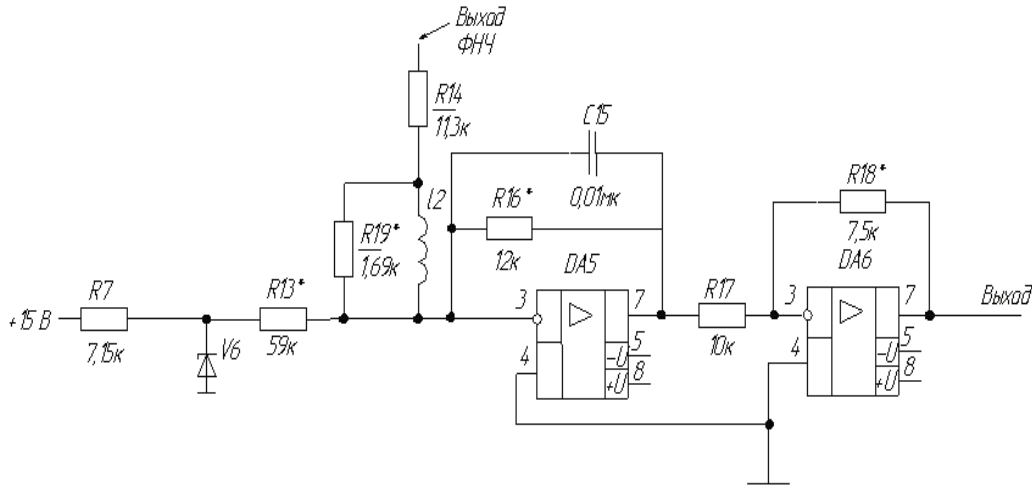


Рис. 1 Фрагмент схемы измерительного канала акселерометра

В ней в качестве измерительной цепи термодатчика используется выходной нормирующий усилитель акселерометра, обеспечивающий одновременное регулирование смещения нуля (микросхема DA5 и резисторы R14*, R16). Функция преобразования термокомпенсирующей цепи в соответствии с этой схемой описывается уравнением

$$K_{\Sigma t} = -\frac{2\Delta r}{R14^* + r_0} \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta r}{R14^* + r_0}\right)^2}, \quad (1)$$

где r_0 , α_t – заранее определенные параметры функции преобразования датчика температуры, $\Delta r = r_0(1 \pm \alpha_t \cdot \Delta T)$; K_t – требуемое значение коэффициента преобразования усилителя DA5, определяемое из условия $K_t = -(K_{ФНЧ_t} + K_{ПНЧ_t})$, где $K_{ФНЧ_t}$, $K_{ПНЧ_t}$ – коэффициенты влияния изменений температуры окружающей среды на характеристики аналоговой части акселерометра до входа в термокомпенсирующую цепь и преобразователя «напряжение–частота», соответственно; Δr , r_0 – изменение сопротивления медной катушки в заданном интервале температур и начальное значение сопротивления, определенное при температуре 20 °С (определяется по результатам косвенных измерений в составе акселерометра).

Согласно формуле (1), составляющая $\frac{\Delta r}{R14^* + r_0}$ будет определять точность расчета резистора R14*. При соотношении $r_0 \approx 900$ Ом, $R14^* \geq 10$ кОм, $\Delta r \approx 200$ Ом значение составляющей не будет превышать 0,04 %. Пренебрегая

значимостью этой величины, определим значение сопротивления регулировочного резистора в зависимости от требуемой величины $K_{\Sigma t}$ по формуле

$$R14^* = \frac{2\Delta r}{K_{\Sigma t}} - r_0 .$$

Абсолютная величина $K_{\Sigma t}$ устанавливается равной коэффициенту влияния изменений температуры окружающей среды на коэффициент преобразования акселерометра без термокомпенсации. Для изменения знака $K_{\Sigma t}$ датчик температуры необходимо включать последовательно с резистором $R16$, а его величину определять по формуле

$$R16 = \frac{2\Delta r - K_t \cdot r_0}{K_{\Sigma t}} - r_0 .$$

Температурный коэффициент сопротивления меди [3] $\approx 0,43 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

Для вычисления сопротивления резистора $R14$ необходима информация о значениях коэффициентов $K_{\text{ФНЧ}}$, $K_{\text{ПНЧ}}$ и коэффициента усиления цепи, представленной на рис. 1. Для этого предлагается следующая процедура: при значениях температуры окружающей среды -50 , $+20$ и $+50$ $^\circ\text{C}$ определяются выходные сигналы ФНЧ, усилителя $DA6$ и акселерометра в целом при изменении измеряемого ускорения в интервале $\pm 1g$.

Преимуществами такого способа включения являются простота расчета номинала регулировочного резистора и теоретическая возможность компенсации широкого диапазона температурных погрешностей. Однако область применения этого способа ограничена такими значениями погрешности, когда для ее компенсации требуется установка резистора $R14^*$ большого номинала. В этом случае температурное изменение сопротивления регулировочного резистора становится сравнимым с температурными изменениями сопротивления катушки, что при проработке модели не учитывается. Таким образом, уравнивание способом последовательного включения регулировочного резистора не позволяет качественно скомпенсировать малые значения температурных погрешностей акселерометра.

Проведенные температурные испытания показали, что временная стабильность коэффициента преобразования акселерометров с предложенной цепью термокомпенсации составляет величину не более $0,1 \text{ \%}$, что позволяет сделать вывод о достаточной эффективности примененного метода компенсации температурной погрешности акселерометра.

При параллельном включении регулировочного резистора номиналы используемых резисторов ограничиваются значениями в $4\text{--}5$ кОм, вследствие чего температурное изменение сопротивления регулировочного резистора пренебрежимо мало по сравнению с изменением сопротивления катушки.

Функция преобразования термокомпенсирующей цепи в соответствии с этой схемой описывается уравнением

$$K_{\Sigma t} = \frac{R14 + \frac{r_0 \cdot R19^*}{r_0 + R19^*}}{1} \cdot \frac{1}{R14 \cdot K_1 + \frac{r_3 \cdot K_1 \cdot R19^*}{r_3 + K_1 \cdot R19^*}} - \frac{1}{R14 \cdot K_2 + \frac{r_1 \cdot K_2 \cdot R19^*}{r_1 + K_2 \cdot R19^*}} , \quad (2)$$

где $R19^*$ – сопротивление регулировочного резистора; r_0 – сопротивление катушки; $r_1 = r_0 \cdot 0,734$ – сопротивление катушки при -50 °С; $r_3 = r_0 \cdot 1,114$ – сопротивление катушки при $+50$ °С; $K_1 = 1,0045$ – значение собственного изменения сопротивления резистора типа С2-36 в условиях изменения температуры окружающей среды при $+50$ °С; $K_2 = 0,9895$ – значение собственного изменения сопротивления резистора типа С2-36 в условиях изменения температуры окружающей среды при -50 °С.

Для температурной отладки акселерометра при таком способе включения регулировочного резистора требуются только массив значений периода выходного сигнала при -50 , $+20$ и $+50$ °С, значение сопротивления катушки и предыдущее значение сопротивления регулировочного резистора. Область применения этого способа ограничивается сверху, поскольку значениям температурной погрешности, превышающим 2,5 %, соответствует значение сопротивления $R19^*$ более 10 кОм, при котором температурное изменение сопротивления регулировочного резистора становится сравнимым с изменением сопротивления катушки.

Значение номинала регулировочного резистора может быть получено путем решения уравнения (2) относительно переменной $R19^*$. Поскольку выражение для номинала регулировочного резистора представляет собой уравнение третьей степени, решение которого представляет значительную сложность, поиск решений этого уравнения необходимо осуществлять с применением специализированных программных средств.

Решение данного уравнения в символьном виде было реализовано в разработанном программном комплексе на языке программирования Maple 7.

На основании вышеизложенного наиболее оптимальным вариантом термокомпенсации представляется включение регулировочных резисторов и последовательно, и параллельно медной катушке. Этот способ позволяет наиболее качественно скомпенсировать температурную погрешность в широком диапазоне. В то же время при таком способе термокомпенсации не возникает необходимости наращивания количества номиналов резисторов в подборочных рядах. Собственное температурное изменение сопротивления регулировочных резисторов пренебрежимо мало по сравнению с изменением сопротивления катушки, что позволяет не учитывать этот фактор при моделировании.

Моделирование, проведенное при помощи разработанного программного комплекса, позволило установить оптимальные области применения каждого из способов включения регулирующего резистора. При этом также установлено, что границы оптимальных областей определяются приемлемым соотношением температурных изменений сопротивления регулирующего резистора и сопротивления обмотки датчика температуры. Определено также, что систематическая температурная погрешность, основным источником которой является нестабильность индукции в зазоре магнитной системы обратного преобразователя (величиной до 0,002 % °С), с наименьшей трудоемкостью компенсируется при параллельном включении регулирующего резистора и обмотки датчика температуры. При систематических погрешностях, превышающих указанную величину, к наилучшему результату приводят последовательное и последовательно-параллельное включение регулирующих резисторов. Средствами программы Maple при известных значениях электриче-

ских сопротивлений регулирующего резистора и катушки датчика температуры, измеренных перед началом испытаний, по результатам определительных температурных испытаний акселерометра вычисляется значение сопротивления регулирующего резистора, обеспечивающее минимизацию температурной погрешности.

2 Моделирование температурного градиента индукции

Для расчета неоднородных, нестационарных температурных полей датчиков предлагается использовать приближенный численный метод, представляющий собой модифицированный вариант метода «элементарных» балансов.

Выбор этого метода обусловлен сложностью поставленных и решаемых нестационарных температурных задач, разнообразием и взаимосвязанностью физических явлений и процессов, имеющих место в рассматриваемых классах датчиков, другими их особенностями.

Для составления тепловых балансов используются основные законы теплообмена:

– закон сохранения энергии:

$$\int_F Q_n dF = \frac{\partial E}{\partial t} = \int_{\Omega} c \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega ; \quad (3)$$

– закон Фурье:

$$Q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} ; \quad (4)$$

– закон Ньютона:

$$Q = \alpha(T - T_c) ; \quad (5)$$

– закон Стефана–Больцмана:

$$E = \varepsilon \sigma_0 T^4 , \quad (6)$$

где Q_n – составляющая теплового потока, нормальная к элементу поверхности dF ; F – поверхность, ограничивающая некоторый объем Ω ; E – внутренняя энергия среды, заключенной в объеме, ограниченном поверхностью F ; c – теплоемкость объема; Q – удельный тепловой поток; T – температура объема; T_c – температура окружающей объем среды; α – коэффициент теплоотдачи единицы поверхности тела; E – плотность интегрального излучения; ε – степень черноты поверхности; σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана.

Использование основных законов и гипотез теплообмена приводит к непосредственному получению расчетных алгоритмов, минуя стадию составления дифференциальных уравнений.

Сущность метода расчета заключается в следующем.

Датчик (прибор, система, устройство) разбивается на ряд конечных «элементарных» геометрических форм (объемов). Это могут быть параллелепипеды, цилиндрические, шаровые сегменты и другие канонические формы, определяемые конструктивными особенностями различных типов датчиков.

Основной алгоритм расчета температурного поля, полученный на основе метода тепловых балансов и принятых допущений для рассматриваемого типа датчиков, состоящих из твердотельных элементарных объемов, имеет следующий вид:

$$T_i(t + \Delta t) = \left[1 - \frac{\Delta t}{c_i} \left(\sum_{j=1}^M q_{ij} + q_{ic} \right) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} \left(\sum_{j=1}^M q_{ij} T_j + q_{ic} T_c + Q_i \right), \quad (7)$$

где $T_i(t)$, $T_i(t + \Delta t)$ – температуры i -го объема, соответственно, в настоящий и последующий моменты времени; c_i – теплоемкость; q_{ij} – теплопроводимости между объемами i, j ; q_{ic} – теплопроводимость между i -м объемом и окружающей или измеряемой средой; Q_i – мощность источников или стоков тепла; Δt – шаг расчета; M – количество объемов, имеющих тепловой контакт с i -м объемом; N – количество объемов; $i = 1, \dots, N$.

Величина суммарной тепловой проводимости, характеризующаяся входящими в выражение (7) коэффициентами теплопроводимости q_{ij} , может быть представлена в виде

$$q_{ij} = q_T + q_K + q_{И} = \alpha_T f_T + \alpha_K f_K + \alpha_{И} f_{И}, \quad (8)$$

где $q_T, q_K, q_{И}$ – коэффициенты теплопроводимости, учитывающие теплообмен в соответствии с теплопроводностью, конвекцией и излучением; $\alpha_T, \alpha_K, \alpha_{И}$ – функции геометрических и теплофизических параметров элементарных объемов; $f_T, f_K, f_{И}$ – функции температур.

Заключение

Таким образом, предложенный способ расчета позволяет учитывать основные виды теплообмена, имеющие место в рассматриваемых классах датчиков. Формулы и соотношения, по которым рассчитываются эти коэффициенты, для основных случаев теплообмена в приборах и некоторых специальных случаях получены на основе законов тепломассообмена Фурье, Ньютона, Стефана–Больцмана, критериальных уравнений Нуссельта, Рейнольдса, Грасгофа, Прандтля, теории подобия аэродинамических, электрических и тепловых процессов и экспериментальных исследований. К полученным разностным и другим соотношениям (7), (8) и формулам необходимо добавить начальные условия, и задача сведется к определению функций $T_i(t)$ по всем элементарным объемам в каждый момент времени.

Список литературы

1. Мокров, Е. А. Статико-динамические акселерометры для ракетно-космической техники / Е. А. Мокров. – Пенза : ПАИИ, 2044. – 164 с.
2. Джашигов, В. Э. Динамика температурно-возмущенных гироскопических приборов и систем / В. Э. Джашигов, В. М. Панкратов. – Саратов : Изд-во Саратовск. ун-та, 1998. – 236 с.
3. Таблицы физических величин : справочник / под ред. академика И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1006 с.

Алексеева Вера Владимировна
аспирант,
Пензенский государственный
университет

E-mail: alekseeva_vv@yandex.ru

Alekseeva Vera Vladimirovna
the post-graduate student,
the Penza state university

Скаморин Денис Анатольевич
аспирант,
Пензенский государственный
университет

E-mail: skamorec@yandex.ru

Skamorin Denis Anatolevich
the post-graduate student,
the Penza state university

УДК 621.3.032.262.2

Алексеева, В. В.

Метод компенсации температурной погрешности коэффициента преобразования прецизионных акселерометров / В. В. Алексеева, Д. А. Скаморин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 118–124.