

А. Н. Бормотов, Г. Н. Косоротов, Е. М. Белозубов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА МЭМС-СТРУКТУРЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ДАТЧИКОВ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются тонкопленочные тензорезисторные датчики давления (ТТДД) и их чувствительные элементы, которые выполнены в виде МЭМС-структур. Предметом исследования являются влияние нестационарных температур и термодформаций на температурные поля, деформации и электрические параметры тензодатчиков. Цель работы – на основе математического моделирования температурных полей, деформаций и электрических параметров тензодатчиков разработать методы и средства минимизации влияния нестационарных полей температур и термодформаций с одновременным измерением температур тензорезисторов.

Материалы и методы. Исследования проводились с применением принципов и методов системного анализа, теории математического моделирования и математической статистики в условиях действия нестационарных полей температур и термодформаций с одновременным измерением собственных температур тензорезисторов.

Результаты. Разработаны методы и средства минимизации погрешностей измерения давления в условиях действия нестационарных температур и термодформаций. Получены математические модели неинформативного преобразования термоЭДС в выходной сигнал тонкопленочных МЭМС-структур ТТДД с идентичными тензоэлементами, при необходимости из которых могут быть получены решения для любых ТТДД с мостовой схемой.

Выводы. Преимуществом предложенных решений является уменьшение влияния нестационарной температуры за счет возможности отдельного учета температуры каждого из тензорезисторов. Кроме того, преимуществом рассматриваемого решения является то, что индивидуальный учет температуры каждого тензорезистора позволяет учесть индивидуальные температурные характеристики каждого, тем самым снизив погрешности измерения в условиях действия нестационарных полей температур и термодформаций.

Ключевые слова: моделирование, тензорезистор, терморезистор, термодформации, нестационарные температуры, нестационарные поля температур.

A. N. Bormotov, G. N. Kosorotov, E. M. Belozubov

MATHEMATICAL MODELING OF TRANSIENT TEMPERATURES' EFFECT ON MEMS-STRUCTURES OF THIN-FILM RESISTIVE-STRAIN SENSORS

Abstract.

Background. The object of the study is a thin-film resistive-strain pressure sensor (TRPS) and sensing elements, which are constructed in the form of MEMS

¹ Работа выполнена при поддержке гранта в рамках государственных заданий вузам на 2014 г. на тему «Научные основы и программные средства для нано-, био-, инфо- и когнитивных технологий моделирования и синтеза композиционных функциональных материалов со специальными свойствами», проект № 7.7939.2013, рег. № 01201371030.

structures. The subject of study is the impact of transient temperatures and thermal deformations in the temperature field, deformation and electrical parameters of the load cells. The purpose of work is to develop methods and means to minimize the effect of transient temperature fields and thermal deformations with simultaneous measurement of temperature gages on the basis of mathematical modeling of temperature fields, deformation and electrical parameters of load cells.

Materials and methods. The studies were conducted using the principles and methods of system analysis, theory of mathematical modeling and mathematical statistics under conditions of unsteady temperature fields and thermal deformations with simultaneous measurement of its own temperature gages.

Results. The authors developed the methods and means of minimizing errors in measurement of pressure in conditions of transient temperature and thermal deformations. The researchers obtained a mathematical model of uninformative conversion of a thermal EMF into an output signal of thin-film MEMS structures of TRPS with identical tensoelements, which can provide solutions for any TRPS with the bridge circuit if necessary.

Conclusions. The advantage of the proposed solutions is the reduced impact of non-stationary temperatures due to the possibility of separate accounting of the temperature of each strain gauge. In addition, the advantage of this solution is that the temperature of each individual account gage allows to consider the individual characteristics of each temperature, thereby reducing the error of measurement under conditions of unsteady temperature fields and thermal deformations.

Key words: modeling, strain gage, thermistor, thermal deformation, transient temperature, transient temperature field.

Введение

В настоящее время для измерения давлений при экстремальных условиях эксплуатации наиболее широко используются тонкопленочные тензорезисторные датчики давления (ТТДД). Характеристики ТТДД во многом определяются характеристиками их чувствительных элементов, которые выполнены в виде микроэлектромеханических систем (МЭМС). Учитывая, что достаточно часто информация о величине давления в условиях воздействия нестационарных температур обладает наибольшей ценностью, задача минимизации погрешности измерения в этих режимах является весьма актуальной. В соответствии с [1, 2] нестационарная температура меняется как во времени, так и в пространстве. Из-за недостаточной эффективности, сложности реализации и отсутствия системного подхода применение известных методов и средств минимизации влияния нестационарных температур в серийных ТТДД не позволило достичь необходимых результатов, что делает необходимым проведение исследований по созданию новых эффективных методов и средств минимизации влияния нестационарных температур и их системному применению совместно с известными методами и средствами.

Пассивные методы и средства минимизации влияния нестационарных температур условно можно разделить следующим образом:

- методы и средства минимизации влияния нестационарных полей температур;
- методы и средства минимизации влияния нестационарных полей температур и термодформаций;
- методы и средства минимизации влияния нестационарных полей температур с измерением температур тензорезисторов.

Методы и средства минимизации влияния нестационарных полей температур

Рассмотрим на примере модели МЭМС-структуры датчика (рис. 1), содержащего контактные площадки 1–6, мембрану 7, тензорезисторы 8–11, термокомпенсационный резистор 12 в виде змейки, перемычку 13.

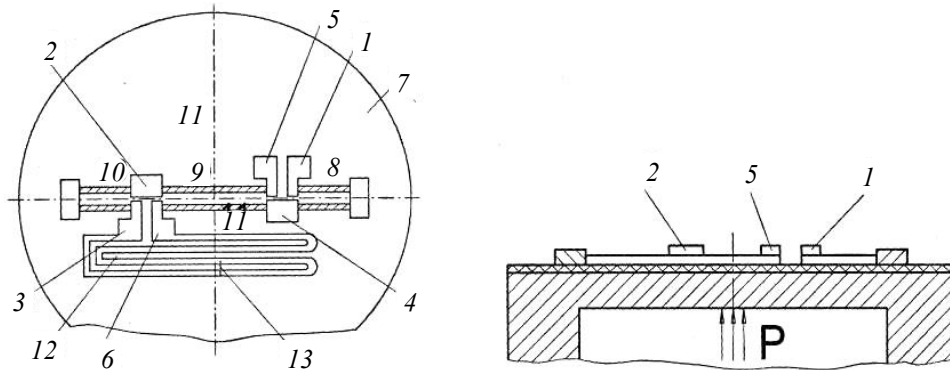


Рис. 1. Модель МЭМС-структуры ТТДД с компенсацией нестационарного температурного поля

Термокомпенсационный резистор выполняют в виде тонкопленочной структуры с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) существенно большим ТКС тензорезисторов и располагают его на мембране в зоне максимального градиента нестационарного температурного поля. Сущность метода состоит в следующем. При нормальных климатических условиях измеряют выходные сигналы ТТДД при полностью закороченном термокомпенсационном резисторе 12 и при полностью включенном этом резисторе. Затем воздействуют на чувствительный элемент жидким азотом и измеряют при этом его выходной сигнал. С учетом указанных значений выходных сигналов расчетом получают значение термокомпенсационного резистора 12, которое достигается закорачиванием части змейки перемычкой 13.

Методы и средства минимизации влияния нестационарных полей температур и термодформаций

Методы и средства (рис. 2) рассмотрим на примере МЭМС-структуры датчика, содержащего упругий элемент (УЭ) 1 в виде жесткозащемленной мембраны, с диэлектриком 2, на котором расположена мостовая тензочувствительная схема, состоящая из тензорезисторов R_1 – R_4 и контактных площадок 3–8. В мостовую схему включены два компенсационных резистора. Тензокомпенсационный резистор 9 выполнен с большим по сравнению с тензорезисторами коэффициентом тензочувствительности.

Для удобства закорачивания резистора 9 на нем выполнены дополнительные контактные площадки 10–14. Термокомпенсационный резистор 15 выполнен с большим по сравнению с тензорезисторами ТКС. При воздействии нестационарной температуры нестационарное температурное поле и поле температурных деформаций приводят к неидентичности среднеинтегральных температур и термодформаций, воспринимаемых тензорезисторами, во время нестационарного процесса. Экспериментально определенные зависимости

среднеинтегральных температур и термодформаций, воспринимаемых тензорезисторами и компенсационными резисторами для датчика с мембраной толщиной 0,22 мм и толщиной заделки 1,5 мм, приведены на рис. 3.

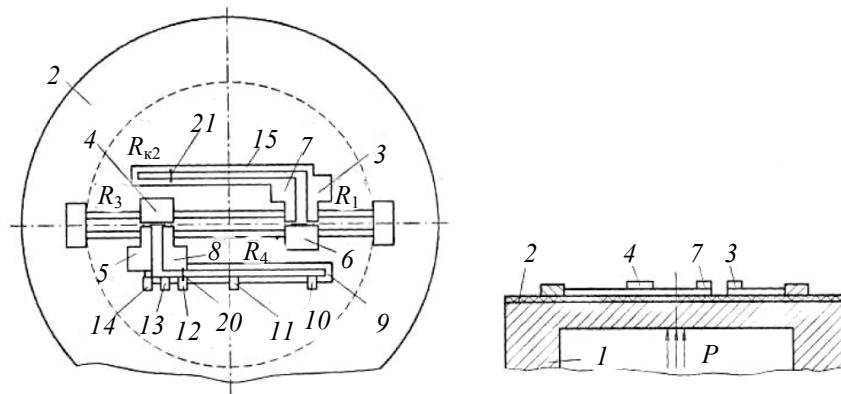


Рис. 2. Модель МЭМС-структуры ТТДД с компенсацией нестационарных полей температур и термодформаций

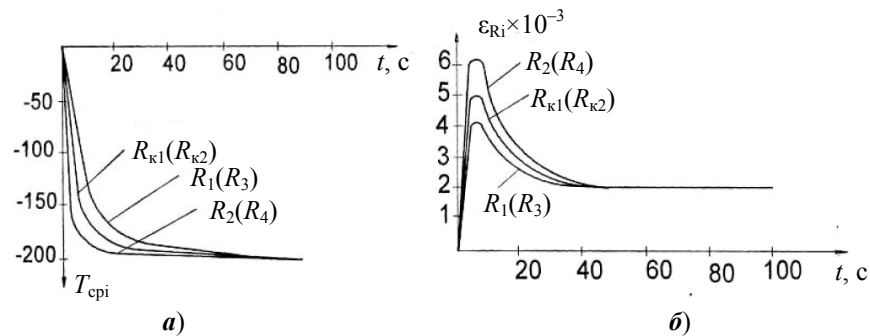


Рис. 3. Распределение температур (а), термодформаций (б) при воздействии нестационарных температур на МЭМС-структуру ТТДД

Метод [3, 4] реализуется следующим образом. При нормальных климатических условиях измеряют выходные сигналы ТТДД при полностью закороченном термокомпенсационном и тензокомпенсационном резисторах и при полностью включенных этих резисторах.

Затем воздействуют на датчик жидким азотом и измеряют при этом выходной сигнал при полностью закороченном термокомпенсационном и тензокомпенсационном резисторах и при полностью включенных этих резисторах. С учетом указанных значений выходных сигналов тензомоста расчетом получают значения термокомпенсационного и тензокомпенсационного резисторов, которые достигаются закорачиванием части этих резисторов перемычками.

Методы и средства минимизации влияния нестационарных полей температур с измерением температур тензорезисторов

Предлагаемое решение [5, 6] целесообразно использовать при применении микропроцессорных систем для обработки информации и невозможности

измерения температур тензорезисторов при помощи терморезисторов, размещенных над тензорезисторами (рис. 4).

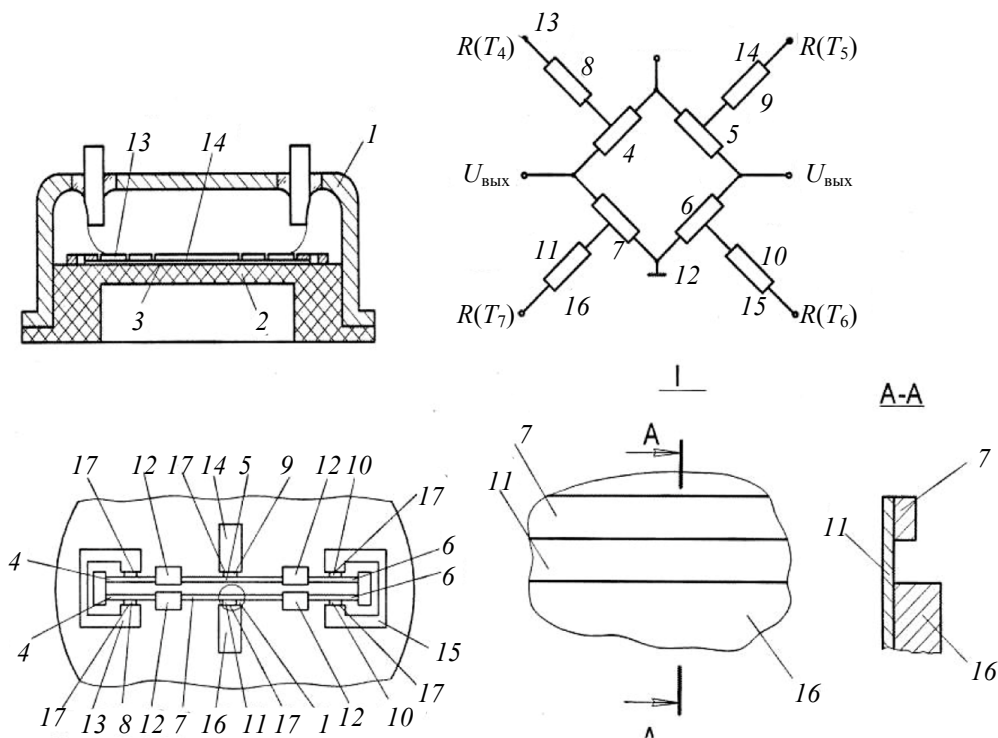


Рис. 4. Модель МЭМС-структуры ТТДД с измерением температур тензорезисторов

В наибольшей степени преимущества решения проявляются в датчиках с токопроводящей мембраной, так как в этом случае отпадает необходимость использования двух диэлектрических слоев (для изоляции тензорезисторов от мембраны и терморезисторов от тензорезисторов). В других случаях применение решения оправдано уменьшением количества выводов с 12 до 8.

Структура (рис. 4) содержит корпус 1, мембрану 2, тензомост 3, сформированный на мембране. Тензомост состоит из тензорезисторов 4–7. Тонкопленочные терморезисторы 8–11 совмещены с соответствующими тензорезисторами. Сопротивления терморезисторов не менее чем на два порядка больше сопротивлений тензорезисторов. Терморезисторы частично расположены между мембраной и соответствующим тензорезистором и частично вне тензорезисторов, вдоль одной из наибольшей сторон соответствующих тензорезисторов, не касаясь их контактных площадок 12. Каждый терморезистор 8–11 имеет только одну контактную площадку 13–16, общим выводом терморезисторов служит одна из контактных площадок чувствительного элемента, что упрощает коммутацию элементов.

При воздействии нестационарной температуры сопротивления тензорезисторов изменяются в зависимости от их номинала, ТКС и местоположения. Так как терморезисторы частично расположены между мембраной и соответствующими тензорезисторами, а частично расположены вне соответствующих тензорезисторов вдоль одной из наибольшей стороны соответствующего

тензорезистора, температура терморезистора с высокой точностью отслеживает температуру тензорезисторов вследствие малого термического сопротивления между тензорезисторами и терморезисторами.

Так как сопротивление терморезисторов существенно больше сопротивления тензорезисторов, влияние терморезисторов на тензорезисторы и тензорезисторов на терморезисторы будет незначительным. Изменение сопротивления терморезисторов от температуры совместно с выходным сигналом тензомоста подается на вход микропроцессора, в котором запрограммирована индивидуальная корреляционная характеристика выходного сигнала тензомоста и сопротивлений терморезисторов [1, 3, 5, 7–10].

Анализируя структуры тензоэлементов окружных и радиальных тензорезисторов, можно отметить, что тензоэлементы как окружных, так и радиальных тензоэлементов образуют с прилегающими перемычками термоэлектрические структуры: «тензорезистивный слой – подслой перемычки» и «подслой перемычки – материал перемычки». Учитывая, что реальное удельное поверхностное сопротивление тензорезисторного слоя существенно больше (не менее чем в 100 раз) удельного поверхностного сопротивления перемычек, термоэлектрическую модель тензоэлемента (окружного или радиального) тензорезистора можно изобразить в виде, приведенном на рис. 5, где $E(T)_{i1}$ – термоЭДС термоэлектрической структуры «основной материал перемычки – подслой перемычки i -го тензоэлемента»; $E(T)_{i2}$ – термоЭДС термоэлектрической структуры «подслой перемычки – тензорезистивный слой i -го тензоэлемента»; $E(T)_{i3}$ – термоЭДС термоэлектрической структуры «тензорезистивный слой – подслой перемычки»; $E(T)_{i4}$ – термоЭДС термоэлектрической структуры «подслой перемычки – основной материал перемычки».

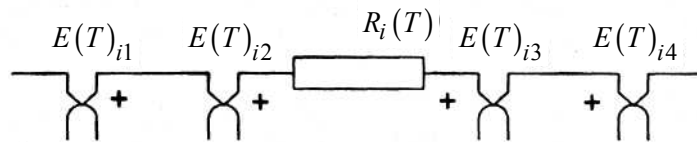


Рис. 5. Термоэлектрическая модель тензоэлемента

В результате анализа МЭМС-структуры (рис. 1, 2, 4) и термоэлектрической модели (рис. 5) получено выражение для выходного сигнала МЭМС-структуры при воздействии нестационарной температуры и отсутствии напряжения питания:

$$U_{\text{вых}}(T) = \frac{\sum_{j=1}^4 \left(\sum_{i=1}^{10} \left[\sum_{m=1}^4 E_{jim}(T) + \int_{T_{\text{н}}}^{T_{\text{к}}} \sigma_{\text{с}ji} dT \right] \right)}{\sum_{j=1}^4 R_j(T)} \cdot [R_4(T) + R_1(T)] +$$

$$+ \sum_{i=1}^{10} \left[\sum_{m=1}^4 E_{1im}(T) + \int_{T_{iH}}^{T_{iK}} \sigma_{\alpha 1i} dT \right] + \sum_{i=1}^{10} \left[\sum_{m=1}^4 E_{4im}(T) + \int_{T_{iH}}^{T_{iK}} \sigma_{\alpha 4i} dT \right],$$

где $\sigma_{\alpha i}$ – коэффициент Томсона для материала i -го тензоэлемента; T_{iH} – температура в начале i -го тензоэлемента; T_{iK} – температура в конце i -го тензоэлемента, $E_{im}(T)$ – m -я термоЭДС i -го тензоэлемента; $R_j(T)$ – сопротивление j -го тензорезистора при температуре T .

Полученное выражение является математической моделью неинформативного преобразования термоЭДС в выходной сигнал тонкопленочных МЭМС-структур ТТДД с идентичными тензоэлементами. При необходимости из него может быть получено выражение для любых ТТДД с мостовой схемой.

Анализ этой модели показал, что наиболее предпочтительными методами компенсации являются методы с использованием специально введенных в МЭМС-структуры компенсационных термоэлектрических структур.

Заключение

На основе математического моделирования температурных полей, деформаций и электрических параметров тензодатчиков для минимизации влияния нестационарных температур предлагаются методы и средства минимизации влияния нестационарных полей температур и термодформаций с одновременным измерением температур тензорезисторов [9, 10].

Преимуществом предложенных решений является уменьшение влияния нестационарной температуры за счет возможности отдельного учета температуры каждого из тензорезисторов. Кроме того, преимуществом рассматриваемого решения является то, что индивидуальный учет температуры каждого тензорезистора позволяет учесть индивидуальные температурные характеристики каждого.

Список литературы

1. Пат. 2031355 Российская Федерация. 6G01B 7/16. Способ термокомпенсации тензомоста / Белозубов Е. М. – Оpubл. 20.03.95, Бюл. № 8.
2. **Абрамов, С. В.** Синтез моделей вихретоковых датчиков и их измерительных цепей / С. В. Абрамов, В. П. Маланин, Г. Н. Косоротов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пенза : ПГТА, 2013. – № 10 (14). – С. 203–209.
3. Пат. 2028584 Российская Федерация. 6G01L 9/04. Тонкопленочный датчик давления и способ его настройки / Белозубов Е. М., Михайлов П. Г. – Оpubл. 09.02.95, Бюл. № 4.
4. **Бормотов, А. Н.** Теоретические основы компьютерного моделирования структурообразования дисперсных систем / Бормотов А. Н., Прошин И. А., Васильков А. В. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 542–551.
5. Пат. 1569613 Российская Федерация. 6G01L 9/04. Датчик давления / Белозубов Е. М. – Оpubл. 07.06.90, Бюл. № 21.
6. **Бормотов, А. Н.** Имитационное моделирование деструкции и метод прогнозирования стойкости композиционных материалов / А. Н. Бормотов, И. А. Прошин, Е. В. Королев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 4. – С. 113–118.

7. **Бормотов, А. Н.** Методологические принципы математического моделирования и синтеза композиционных материалов из отходов нефтепереработки / А. Н. Бормотов, М. В. Кузнецова, Е. А. Колобова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (38). – С. 85–94.
8. **Маланин, В. П.** Математическое и физическое моделирование при построении измерительных цепей параметрических датчиков с использованием активных комплексных величин / В. П. Маланин, Г. Н. Косоротов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2012. – № 5. – С. 156–161.
9. **Бормотов, А. Н.** Система управления качеством при математическом моделировании и многокритериальном синтезе наномодифицированных композитов специального назначения / А. Н. Бормотов, И. А. Прошин, М. В. Кузнецова // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2014. – Т. 64, № 2. – С. 110–118.
10. **Бормотов, А. Н.** Теоретические основы математического моделирования композитов из отходов нефтепереработки / А. Н. Бормотов, М. В. Кузнецова, Е. А. Колобова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – Т. 1, № 9 (13). – С. 173–182.

References

1. Patent 2031355 Russian Federation, 6G01B 7/16. *Method of tensobridge thermal compensation*. Belozubov E. M. Publ. 20 March 1995, bull. no. 8.
2. Abramov S. V., Malanin V. P., Kosorotov G. N. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. Penza: PGTA, 2013, no. 10 (14), pp. 203–209.
3. Patent 2028584 Russian Federation, 6G01L 9/04. *Thin-film pressure sensor and tuning method thereof*. Belozubov E. M., Mikhaylov P. G. Publ. 09 February 1995, bull. no. 4.
4. Bormotov A. N., Proshin I. A., Vasil'kov A. V. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2011, vol. 17, no. 2, pp. 542–551.
5. Patent 1569613 Russian Federation, 6G01L 9/04. *Datchik davleniya* [Pressure sensor]. Belozubov E. M. Publ. 07 June 1990, bull. no. 21.
6. Bormotov A. N., Proshin I. A., Korolev E. V. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Izhevsk State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 113–118.
7. Bormotov A. N., Kuznetsova M. V., Kolobova E. A. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2013, no. 2 (38), pp. 85–94.
8. Malanin V. P., Kosorotov G. N. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2012, no. 5, pp. 156–161.
9. Bormotov A. N., Proshin I. A., Kuznetsova M. V. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Institute of system analysis of the Russian Academy of Sciences]. 2014, vol. 64, no. 2, pp. 110–118.
10. Bormotov A. N., Kuznetsova M. V., Kolobova E. A. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2013, vol. 1, no. 9 (13), pp. 173–182.

Бормотов Алексей Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматизации и управления,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова, 1а/11)

E-mail: aleks21618@yandex.ru

Bormotov Aleksey Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of automation and control,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova lane, Penza, Russia)

Косоротов Геннадий Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизации и управления,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова, 1а/11)

E-mail: aleks21618@yandex.ru

Kosorotov Gennadiy Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of automation
and control, Penza State Technological
University (1a/11 Baydukova lane,
Penza, Russia)

Белозубов Евгений Михайлович

доктор технических наук, начальник
отдела, Научно-исследовательский
институт физических измерений (Россия,
г. Пенза, ул. Володарского, 10)

E-mail: aleks21618@yandex.ru

Belozubov Evgeniy Mikhailovich

Doctor of engineering sciences, head
of department, Research Institute
of Physical Measurements
(10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.5.62-6:51-74

Бормотов, А. Н.

Математическое моделирование влияния нестационарных температур на МЭМС-структуры тонкопленочных тензорезисторных датчиков / А. Н. Бормотов, Г. Н. Косоротов, Е. М. Белозубов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 147–155.