

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 531.787.084.2

*А. Г. Дмитриенко, А. А. Трофимов*

### МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ДАТЧИКЕ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

*A. G. Dmitrienko, A. A. Trofimov*

### THE MODEL OF THERMAL PROCESSES IN LINEAR DISPLACEMENT SENSOR

**А н н о т а ц и я.** На основании расчета температурных полей датчика линейных перемещений, построенного на применении численного метода и метода «элементарных» балансов с использованием основных законов теплообмена, получены результаты математического моделирования тепловых режимов его работы при различных условиях его эксплуатации в соответствии с воздействием на него теплового потока. Рассмотрена конструкция и тепловая модель бесконтактного трансформаторного датчика перемещений, представлены топограммы температурного поля датчика при различных режимах его работы.

**A b s t r a c t.** On the basis of the calculation of the temperature fields of the linear displacement sensor, built on the application of the numerical method and the method of "elementary" balances using basic laws of heat transfer, the results of mathematical modeling of thermal operating modes under various conditions in accordance with the influence of the heat flux. Considered design and the thermal model of the contactless transformer motion sensor, presents topogram temperature field of the sensor at different operation modes.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** датчик перемещений, тепловая модель, топограмма, температурное поле, градиент температуры.

**К e y w o r d s:** motion sensor, thermal model topogram, temperature field, the temperature gradient.

Современные датчики физических величин (давления, температуры, перемещений, инерциальной информации и др.) представляют собой сложные многокомпонентные динамические системы, в которых протекают взаимосвязанные физические процессы различной природы (тепловые, механические, упругие и термоупругие, электрические, оптические и др.), в связи с этим становится актуальным исследование воздействия неоднородных нестационарных тепловых полей на датчиковую аппаратуру [1–4]. Тепловые переходные процессы во многом определяют не только точность датчиков, но и такие важные характеристики как долговечность, надежность, время готовности и в конечном итоге эффективность их работы. Для ускорения разработки датчиковой аппаратуры необходимо уже на этапе проектирования, не

прибегая к дорогостоящим натурным испытаниям, знать влияние реальных условий эксплуатации на выходные характеристики датчика. При использовании математического моделирования становится возможным комбинирование различных начальных условий эксплуатации, материалов и временных характеристик воздействия возмущающих факторов, поэтому одной из актуальных задач при построении и исследовании математических моделей датчиков и приборов на их основе является определение с достаточно высокой точностью (до десятых долей градуса) температурного поля датчика, а также оценка его влияния на работоспособность и метрологические характеристики.

На базе Научно-исследовательского института физических измерений (НИИФИ, г. Пенза) с помощью программных комплексов «Термоудар» и «DLP», разработанных в сотрудничестве с институтом проблем точной механики и управления (ИПТМУ РАН, г. Саратов), был проведен ряд исследований в области математического моделирования воздействия нестационарных температур на датчики перемещений.

**Объект исследований** – датчик линейных перемещений (ДЛП) [5–7], предназначенный для бесконтактного преобразования статико-динамических линейных перемещений контролируемого объекта в разность фаз между двумя синусоидальными напряжениями. В конструкции датчика реализована дифференциально-трансформаторная схема, основным элементом которой является чувствительный элемент, содержащий магнитопровод с разделенными цепями рабочей и компенсационных частей.

Была поставлена задача аналитического и компьютерного исследования нестационарного, неоднородного, осесимметричного температурного поля бесконтактного электромагнитного датчика перемещений, предназначенного для измерения линейных перемещений в диапазоне до 40 мм, при воздействии на него теплового потока с температурой до 2500 °С в течение 2,5 с в соответствии с требованиями заказчика. График воздействия окружающего теплового потока на ДЛП представлен на рис. 1.

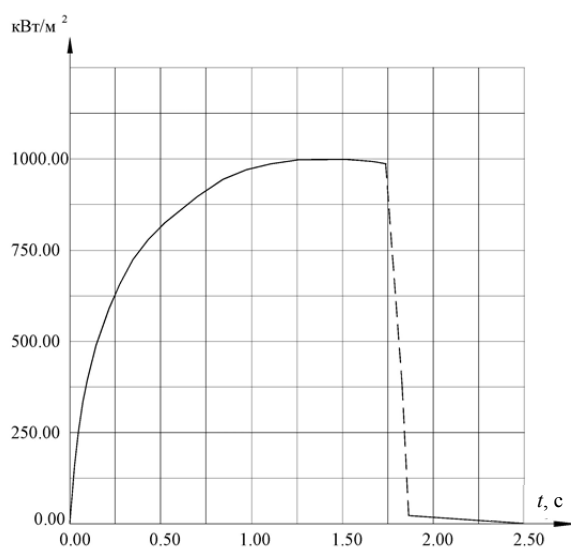


Рис. 1. Зависимость мощности усредненного теплового потока от времени

На рис. 2 приведена конструктивная схема ДЛП, где: 1 – корпус (соответствующие объемы на рис. 3): (объемы 23, 24, 40, 41); 2 – сердечник (объемы 11, 20–22, 37); 3 – ближняя к рабочему зазору разделительная пластина (объемы 12–14); 4 – дальняя от рабочего зазора обмотка 4-секционной катушки (объемы 27, 32, 33); 5 – ближний к рабочему зазору фланец (объемы 4–6); 6 – контактная плата (объемы 42–44); 7 – экран (объемы 45–47); 8, 9 – средние обмотки 4-секционной катушки (объемы 15–17, 25, 28, 29); 10 – дальний от рабочего зазора фланец (объемы 38–39); 11 – ближняя к рабочему зазору обмотка 4-секционной катушки (объемы 7–9); 12 – дальняя от рабочего зазора разделительная пластина (объемы 26, 30, 31); 13 – лента на подвижной части изделия (объект контроля); 14 – тепловоспринимающая пластина (объемы 1–3), а на рис. 3 – разбивка модели датчика на элементарные объемы.

Элементарные объемы имеют теплофизические и геометрические характеристики и тепловые связи, соответствующие реальной конструкции. Для упрощения на элементарные объемы разбивается половина датчика, остальная часть полностью ей симметрична. Крышка (объемы 48–50) и клей-отвердитель ВК-9 (объемы 10, 18, 19, 34–36) на рис. 2 не обозначены.

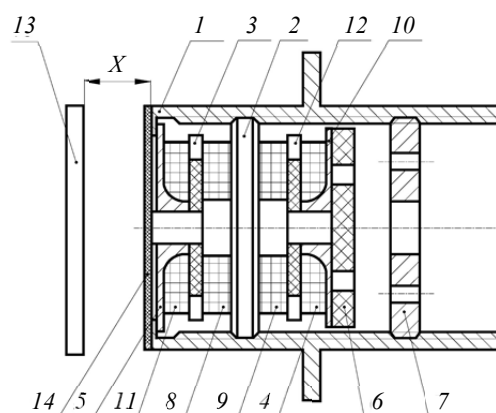


Рис. 2. Конструктивная схема бесконтактного датчика линейных перемещений

При отсутствии термостатирования для уменьшения температурной погрешности необходимо обеспечивать тепловую защиту ДЛП от нестационарного воздействия теплового потока со стороны торцевой поверхности (плоскости чувствительности). Для тепловой защиты ДЛП применена тепловоспринимающая пластина из фторопласта (поз. 14 рис. 2). Итогом исследований явилось нахождение такого оптимального сочетания материалов и конструктивных особенностей датчика, при котором обеспечивается надежная теплозащита чувствительного элемента за время воздействия теплового потока.

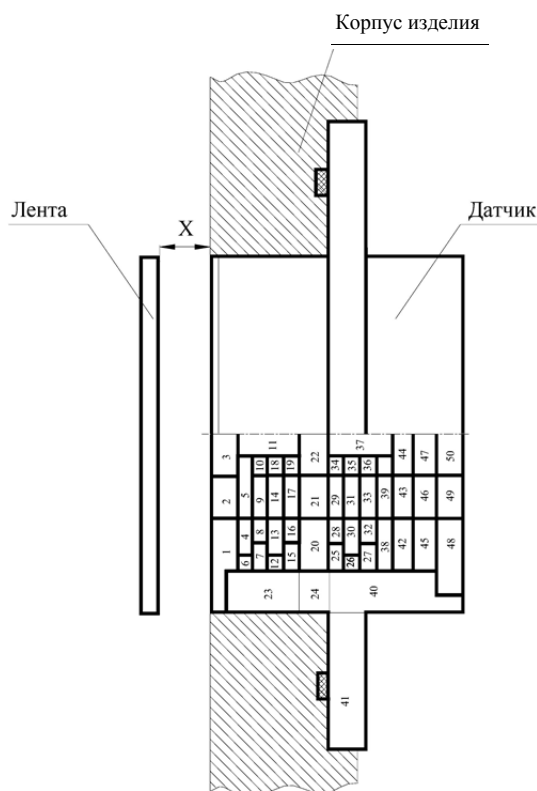


Рис. 3. Тепловая модель датчика перемещений с разбиением на элементарные объемы

При расчете неоднородных трехмерных нестационарных температурных полей датчиков физических величин используется приближенный численный метод [8], представляющий

собой модифицированный вариант метода «элементарных» балансов. Для составления тепловых балансов используются такие основные законы теплообмена, как закон сохранения энергии, закон Фурье, закон Ньютона, закон Стефана–Больцмана и др. Использование основных законов и гипотез теплообмена приводит к непосредственному получению расчетных алгоритмов, минуя стадию составления дифференциальных уравнений. «Элементарными» геометрическими объемами, на которые разбиваются модели датчиков, 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 [7]:

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

где  $T_i(t)$ ,  $T_i(t + \Delta t)$  – температуры  $i$ -го объема в настоящий и последующий моменты времени соответственно;  $\Delta t$  – шаг расчета;  $c_i$  – 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;  $m$  – количество объемов, имеющих тепловой контакт с  $i$ -м объемом;  $n$  – количество объемов;  $i = 1, \dots, n$ .

Значение суммарной тепловой проводимости, характеризующейся входящими в (1) коэффициентами теплопроводимости  $q_{ij}$ , может быть представлено в виде

$$q_{ij} = q_T + q_K + q_H = \alpha_T f_T + \alpha_K f_K + \alpha_H f_H, \quad (2)$$

где  $q_T, q_K, q_H$  – коэффициенты теплопроводимости, учитывающие теплообмен в соответствии с теплопроводностью, конвекцией и излучением;  $\alpha_T, \alpha_K, \alpha_H$  – функции геометрических и тепловых физических параметров элементарных объемов;  $f_T, f_K, f_H$  – функции температур.

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 и критериальных уравнений Нуссельта, Рейнольдса, Грасгофа, Прандтля, теории подобия аэродинамических, электрических и тепловых процессов и экспериментальных исследований. К полученным разностным и другим соотношениям (1), (2) и формулам необходимо добавить начальные условия, и задача сведется к определению функций  $T_i(t)$  по всем элементарным объемам в каждый момент времени. Построенные и реализованные в программных комплексах алгоритмы, соотношения, формулы составляют основу математической модели тепловых процессов в сложных датчиках, приборах и устройствах и позволяют рассчитывать и проводить анализ в общем случае трехмерных, неоднородных, нестационарных температурных полей этих приборов и устройств в заданном числе расчетных точек.

Моделирование проводилось в трех режимах:

*1-й режим.* Моделируются нестационарные тепловые процессы в датчике линейных перемещений.

*2-й режим.* Соблюдаются условия, как в первом режиме. При этом варьируется толщина тепловоспринимающей пластины для определения ее минимального значения, при котором датчик остается работоспособным в течение заданного интервала времени 2,5 с.

*3-й режим.* Для определения постоянной времени тепловых процессов и выявления интервалов времени, в течение которых скорость изменения температуры в датчике линейных перемещений максимальна, моделируются нестационарные тепловые процессы остывания датчика при отключенном питании и «обычных» (не экстремальных, как в предыдущих режимах) внешних условиях.

Топограммы температурного поля датчика перемещений представлены на рис. 4.

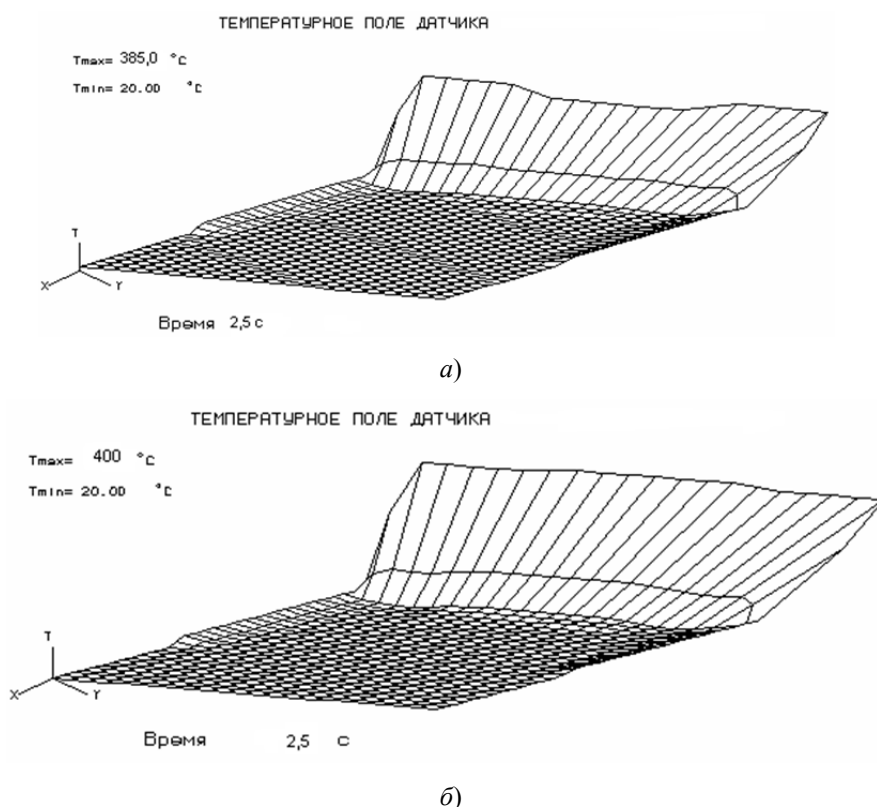


Рис. 4. Топограммы температурного поля датчика перемещений:  
 а –  $T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\max} = 385 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , номинальная толщина тепловоспринимающей пластины 2,0 мм;  
 б –  $T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\max} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , минимальная толщина тепловоспринимающей пластины 1,2 мм

Топограмма пространственного распределения температурного поля в момент времени, когда градиенты температур в датчике максимальны, приведена на рис. 5.



Рис. 5. Топограмма температурного поля датчика перемещений в 3-м режиме (обесточенный прибор) в момент времени 290 с, когда градиенты температур в датчике максимальны

По результатам проведенного моделирования получена картина распределения теплового поля в датчике при воздействии теплового потока в течение 2 с, представленная на рис. 6.

Математическое моделирование базовых тепловых режимов работы бесконтактного ДЛП при воздействии температуры рабочей среды по заданному закону позволило при разработке датчиков определить их работоспособность и рассчитать в заданный момент времени температуру в любой точке датчика и эффективность теплозащиты в зависимости от мощности и характера теплового потока.

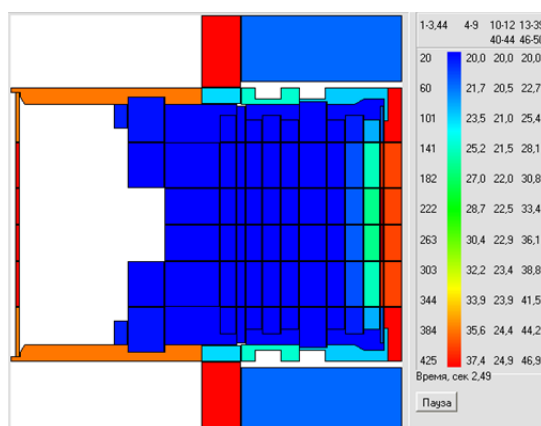


Рис. 6. Распределения теплового поля в датчике

Точность, с которой математическая модель отражает тепловые процессы в реальных конструкциях датчиков, приборов и систем, была подтверждена результатами натурных испытаний, проведенных как на базе ОАО НИИФИ, так и на базе заказчика (ФГУП ГРЦ «КБ им. академика В. П. Макеева»).

### Список литературы

1. Баринов, И. Н. Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления с повышенной временной стабильностью / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 8. – С. 51–55.
2. Баринов, И. Н. Повышение долговременной стабильности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давлений / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2010. – № 3. – С. 9–15.
3. Трофимов, А. А. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : моногр. / А. А. Трофимов, А. Н. Трофимов. – Пенза, 2009. – 200 с.
4. Баринов, И. Н. Состояние разработок и тенденции развития высокотемпературных тензорезистивных датчиков давлений на основе карбида кремния / И. Н. Баринов, Б. В. Цыпин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 11. – С. 50–60.
5. Трофимов, А. А. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений / А. А. Трофимов, Н. Д. Конаков // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 8–10.
6. Гаврилов, В. А. Система измерения линейных перемещений / В. А. Гаврилов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 44–46.
7. Пат. 2208762 Российская Федерация. Амплитудно-фазовый трансформаторный датчик перемещения с фазовым выходом / Трофимов А. А., Конаков Н. Д., Глухов О. Д. – Опубл. 03.12.2001.
8. Джашигов, В. Э. Динамика температурно-возмущенных гироскопических приборов и систем / В. Э. Джашигов, В. М. Панкратов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1998. – 236 с.

#### Дмитриенко Алексей Геннадьевич

кандидат технических наук,  
генеральный директор,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
E-mail: niifi@sura.ru

#### Dmitrienko Aleksey Gennad'evich

candidate of technical sciences,  
director general,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements

#### Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, доцент,  
кафедра информационно-измерительной техники,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: alex.t1978@mail.ru

#### Trofimov Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences, associate professor,  
sub-department of information  
and measuring equipment,  
Penza State University

УДК 531.787.084.2

*Дмитриенко, А. Г.*

**Модель тепловых процессов, протекающих в датчике линейных перемещений** / А. Г. Дмитриенко, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 3 (9). – С. 3–9.