

М.Е. Дробынин, О.Д.М. Аль-Таи, Е.В. Филина, П.А. Львов, С.А. Кузин

**КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
В АВИАЦИОННЫХ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ**

В настоящее время пьезорезистивные датчики давления (ПДД) широко применяются в различных микроэлектронных устройствах, используемых в авиационной технике. Поведение электрического сигнала таких ПДД в основном зависит от температуры окружающей среды. Известно, что на температурный дрейф выходного сигнала ПДД влияют различные факторы: температурный эффект, зависимость сопротивления чувствительного элемента от концентрации примесей, зависимость модуля Юнга мембраны датчика и подложки от температуры и др. Установлено, что разработанная ранее аналитическая калибровочная модель выходного сигнала ПДД, учитывающая отдельные температурные эффекты, не позволяет измерять давление с требуемой точностью в диапазоне изменения температур, характерном для авиационной техники, — от минус 60 до 140 °С. Поэтому для описания зависимости выходного сигнала ПДД от измеряемого давления и температуры используются традиционные полиномиальные математические модели. В работе используется традиционный подход, когда зависимость выходного напряжения от давления представляется с помощью полинома относительно невысокого порядка, а зависимости коэффициентов этого полинома от температуры также задаются соответствующими полиномами. К сожалению, температурные зависимости коэффициентов адекватно описываются только полиномами высокого порядка (не менее 7), что усложняет процедуру идентификации модели и ведет к ошибкам вычислений. Поэтому авторы предложили искать зависимости коэффициентов от температуры в виде кубических сплайнов. В работе подробно описана методика идентификации рассматриваемой полиномиальной модели и получены выражения для корректировки показаний ПДД при измерениях давления в широких температурных пределах. С целью экспериментального подтверждения работоспособности предложенного метода была использована интеллектуальная промышленная автоматизированная система градуировки ПДД, описанная в работе. Показано, как с ее помощью можно снимать экспериментальные данные для градуировки показаний датчика в широких температурных пределах, и описана процедура идентификации математической модели датчика давления, необходимой для минимизации затрат на его сертификацию. Приведены результаты экспериментальных исследований конкретных ПДД, используемых в авиационной технике.

Пьезорезистивный датчик давления; микроэлектромеханический датчик; полиномиальная модель; кубические сплайны; автоматизированная система градуировки.

M.E. Drobynin, O.D.M. Al-Tai, E.V. Filina, P.A. L'vov, S.A. Kuzin

**TEMPERATURE EFFECT COMPENSATION IN AVIATION
PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS**

Currently, piezoresistive pressure sensors (PDS) find expanded applications in various microelectronic devices used in aviation technology. The behavior of the electrical signal of such PDS mainly depends on the ambient temperature. It is known that the temperature drift of the PDS output signal is influenced by various factors: the temperature effect, the dependence of the resistance of the sensitive element on the concentration of impurities, the dependence of the Young's modulus of the sensor membrane and substrate materials on temperature, etc. It was found that the previously developed analytical calibration model of the sensor output signal, which takes into account the models describing individual temperature effects, does not allow the pressure to be measured with the required accuracy in the temperature range characteristic of aviation equipment from -60 °C to 140 °C. Therefore, conventional polynomial mathematical models are used to describe the dependence of the PDS output signal on the measured pressure and temperature. The work uses a traditional approach, when the dependence of the output voltage on pressure is

represented using a polynomial of relatively low order, and the dependences of the coefficients of this polynomial on temperature are also specified by the corresponding polynomials. Unfortunately, the temperature dependences of the coefficients are adequately described only by high-order polynomials (at least 7), which complicates the model identification procedure and leads to computation errors. Therefore, the authors proposed to look for the dependence of the coefficients on temperature in the form of cubic splines. The paper describes in detail the identification technique of the polynomial model under consideration and obtains expressions for correcting the PDS readings when measuring pressure in wide temperature ranges. In order to experimentally confirm the efficiency of the proposed method, an intelligent industrial automated system for the calibration of traffic rules, described in the work, was used. It is shown how it can be used to take experimental data to calibrate the sensor readings over a wide temperature range, and the procedure for identifying the mathematical model of the pressure sensor required to minimize the cost of its certification is described. The results of experimental studies of specific pressure sensors used in aviation technology are presented.

Piezoresistive pressure sensor; microelectromechanical sensor; polynomial model; cubic splines; automated calibration system.

1. Введение. Развитие авиационной техники является одной из приоритетных задач нашего государства. Неотъемлемыми составными элементами всех авиационных транспортных систем являются датчики давления и температуры, которые используются в топливных и гидравлических каналах, системах противообледенения крыльев, предотвращения пожаров на борту и т.д. Одной из задач, с которыми сталкиваются разработчики при проектировании датчиков для авионики, – сохранение их работоспособности и заданных технических характеристик при воздействии различных дестабилизирующих факторов окружающей среды, в частности значительных изменений температуры.

Последние достижения в производстве микроэлектронной техники позволили все шире использовать в измерительном процессе микроэлектромеханические (МЭМ) датчики давления (ДД) [1–14]. Их достоинства: простота применения, небольшие размеры, низкая стоимость и высокая надежность. Недостатком данного вида ДД является зависимость выходного сигнала от температуры, что вызвано температурным дрейфом, включая дрейф нуля усилителей, и изменением чувствительности ДД, обусловленной существенной зависимостью полупроводниковых приборов от температуры [2, 3, 5, 7, 10, 13].

Как правило, в качестве формирователя сигналов пьезоэлектрического ДД (ПДД) используется мостовая схема Уитстона на постоянном токе [5, 6, 8, 10–12, 15, 16]. Выравнивание температурных коэффициентов пьезорезистивных сопротивлений каждого из плеч моста является сложной технической проблемой. Дело в том, что при функционировании ДД резисторы, чувствительные к изменению температуры, сами нагреваются. Из-за различной чувствительности пьезорезисторов (ПР) в плечах мостовой схемы возникает неравномерное распределение температуры внутри ДД. Чувствительность ДД зависит от температурных коэффициентов ПР, которые, в свою очередь, зависят от температуры. В то же время на функциональную связь чувствительности и температурных коэффициентов также влияют тип преобладающих примесей и их концентрации в ПР, температурные характеристики продольного пьезорезистивного коэффициента и модуля Юнга материала, из которого изготовлены ПР, что может оказывать сильное влияние на температурный дрейф чувствительности [1–3, 5–9, 15–17]. Температурный дрейф ДД во многом ограничивает их точность измерения и сферу применения. Для большей температурной стабильности ДД предлагается использовать различные процедуры температурной компенсации [11, 15, 16, 18–24].

Однако в соответствии с последними требованиями ДД для авиационной техники должны обеспечивать относительную погрешность измерения не хуже 0,25 % от измеряемой величины в диапазоне температур от -60 до 140 °С. Поэтому очень сложно предложить эффективную процедуру компенсации влияния температуры на характеристики ДД в таком широком диапазоне ее изменения.

В работах [25–27] учитывалось влияние температуры на точность измерения ПДД с помощью построения зависимости выходного сигнала датчика от измеряемого давления и температуры окружающей среды в виде полиномиальной математической модели. Коэффициенты при степенях полиномов у данной модели идентифицируются на стадии градуировки ПДД. В данной работе авторы предлагают упрощение процедуры идентификации путем аппроксимации получающихся экспериментальных градуировочных кривых кубическими сплайнами. Описываемая методика прошла проверку при обработке реальных экспериментальных данных, а достигаемая точность измерения сравнивается с точностью методов, реализованных в [26, 28, 29].

2. Анализ известных методик компенсации температурных эффектов. В работах [28–30] рассмотрены некоторые ключевые факторы, влияющие на температурный дрейф ПДД: эффект температуры и зависимость сопротивления ПД от концентрации примесей, зависимость модуля Юнга от температуры T и т.д. На основе данного анализа в [29] разработана модель выходного сигнала ПДД:

$$V_0 = \frac{1}{q_0} (q_1 + q_2 + q_3 + q_4) + T(q_5 + q_6) + q_7, \quad (1)$$

где параметры q_0, q_1, \dots, q_7 являются сложными функциями от сопротивлений ПР в плечах мостовой схемы при исходной температуре ($T=300$ °К), температурных коэффициентов этих резисторов, продольного ПР коэффициента при температуре $T=300$ °К, энергии Ферми, постоянной Больцмана, модуля Юнга кремния и коэффициента Пуассона, коэффициентов температурного расширения кремниевой тонкой мембраны и материала подложки и т.д.

В работе [29] приведены результаты идентификации модели (1) из экспериментальных данных, полученных в ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева» (г. Энгельс, Саратовская обл.) для ПДД типа ДД-М. В частности, приведены графики зависимостей выходного сигнала от давления в диапазоне от 1 до 10^7 Па и температуры в диапазоне от -30 до $+50$ °С. Этот тип датчика предназначен для измерения абсолютного или относительного давления от 10^5 до 10^7 Па (от 1 до 100 бар) [29, 30]. Материалом, использованным для его изготовления, является двусторонний полированный монокристалл кремния n -типа с удельным сопротивлением от 3 до 5 Ом/см. Четыре ПР p -типа, сформированные диффузией бора на поверхности диафрагмы датчика, образуют мост Уитстона. Два ПР находятся в радиальном направлении и два других – в поперечном направлении рядом с краем диафрагмы. Диафрагма представляет собой квадрат площадью $1,08$ мм². Толщина диафрагмы составляет от 32 до 160 мкм, в зависимости от номинального интервала измеряемых давлений. После производства пластина крепится анодированием к стеклянной подложке. Чтобы сделать ДД пригодным для промышленного применения и с целью обеспечения оптимальных условий функционирования чувствительного элемента (ЧЭ), должен быть использован специальный корпус. Помещенный в такой корпус ЧЭ, по сути, и есть ДД.

Попытка найти оценки коэффициентов q_i , входящих в (1), из экспериментальных градуировочных данных в требуемом диапазоне температур от -60 до $+140$ °С оказалась неудачной из-за большого разброса значений этих коэффициен-

тов от образца ПДД к образцу. Более того, вследствие нелинейности мостовой схемы модель (1) неадекватно описывала выходной сигнал датчика на краях температурного диапазона при низких (< -30 °С) и высоких (> 80 °С) температурах. Возможные методы компенсации температурной погрешности ДД подробно описаны в работах [11, 15, 16, 18–24], но авторы в них рассматривали существенно более узкие диапазоны изменения температур. Поэтому предлагаемые методики не подходят для учета температурных эффектов в ПДД на низких и высоких температурах, требуемого для точного измерения давления в авиационной технике. В диапазоне температур от -60 до $+140$ °С выходной сигнал ПДД зависит от приложенного давления практически линейно. Но для адекватного описания этой зависимости лучше использовать полиномиальную модель невысокого порядка (≤ 3).

Интересные возможности устранения погрешностей измерения давления в широком диапазоне температур, характерные для мостовой схемы, описаны в работах [31–34], где предложено использовать новую схему формирователя сигнала, названную «петлей переменного тока». Однако публикации по практической реализации нового формирователя пока авторам не известны.

3. Предлагаемая методика компенсации влияния температуры

3.1. Постановка задачи. Изначально предполагается, что ДД используется для проведения измерений в заданном диапазоне давлений $[P_{min}, P_{max}]$ и известном диапазоне температур $[T_{min}, T_{max}]$. Кроме того, предполагается, что контроллер давления и климатические камеры, входящие в состав экспериментальной градуировочной установки, позволяют задавать данные параметры внутри указанных диапазонов с требуемой точностью.

Поскольку вид функциональной зависимости $U = f(P, T)$, связывающей выходной сигнал датчика u с измеряемым давлением P и температурой окружающей среды T , не известен, то математическую модель f можно найти только приближенно в результате экспериментальных исследований с помощью методов аппроксимации характеристик датчика, полученных опытным путем. Для аппроксимации используются полиномиальные зависимости [25–27], в частности, кубические сплайны [35]. Помимо этого, предполагается наличие ошибок измерения выходных сигналов u , т.е. реально измеряется следующая величина:

$$U = f(P, T) + \xi,$$

где ξ – некоторая случайная погрешность измерения.

Для компенсации влияния случайных ошибок измерения на точность искомым математической модели следует в каждой отдельной исследуемой экспериментально точке плоскости с координатами (P_i, T_j) проводить не одно измерение сигнала с выхода датчика, а серию из L измерений и вычислять осредненное значение сигнала в данной точке [26].

На этапе получения экспериментальных данных диапазоны давлений $[P_{min}, P_{max}]$ и температур $[T_{min}, T_{max}]$ равномерно разбиваются на N_P и N_T интервалов, соответственно (рис. 1). За основу взята методика поиска математической модели выходного сигнала ПДД из работ [22, 25, 36, 37], в соответствии с которой сначала находятся зависимости $U(T_j) = f(P, T_j)$, $P \in [P_{min}, P_{max}]$ для всех выбранных значений $T_j \in [T_{min}, T_{max}]$, ($j = 0, 1, \dots, N_T$; $T_0 = T_{min}$, $T_{N_T} = T_{max}$). Т.е. на первом этапе экспериментальные данные, полученные для фиксированной температуры T_j , аппроксимируются полиномом некоторой степени n . На втором этапе происходит поиск зависимости коэффициентов полученного полинома от температуры.

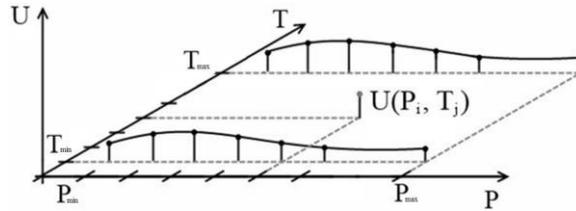


Рис. 1. Схема снятия исходных данных для процедуры идентификации

На основании снятых экспериментальных данных можно аппроксимировать характеристику датчика $u = h(P)$ интерполяционным полиномом, степень которого n подбирается с использованием известных методов математической статистики [36, 37]:

$$U = h(P) = \sum_{r=0}^n a_r P^r \cdot \quad (2)$$

Далее зависимость каждого коэффициента a_r от температуры определяется полиномом вида:

$$a_r = a_r(T) = \sum_{k=0}^K c_{kr} T^k, \quad (r=0, 1, \dots, n), \quad (3)$$

где K – порядок модели; c_{kr} – коэффициенты регрессии, оценки которых вычисляются и далее вводятся в память микропроцессора ПДД.

Исследования показали, что зависимость (2) выходного сигнала от измеряемого давления у МЭМ ПДД адекватно описывается полиномом второй или третьей степени в зависимости от конкретного образца. Однако результаты поиска зависимостей коэффициентов этого полинома от температуры по методике, описанной в [25–27, 30], показали, что порядок моделей (3) получается достаточно высоким ($K = 7 \div 9$) и сильно разнится даже для однотипных датчиков из одной партии. В этом случае находить коэффициенты этих зависимостей по методу наименьших квадратов (МНК) сложно из-за высокой размерности получающихся матриц эксперимента [36, 37] и накапливающихся ошибок вычислений. Поэтому было решено аппроксимировать зависимости коэффициентов полинома (2) от температуры кубическими сплайнами, что является частным случаем кусочно-полиномиальной интерполяции. Для этого весь рассматриваемый диапазон температур $[T_{min}, T_{max}]$ разбивается на M поддиапазонов, в каждом из которых зависимость коэффициента регрессии a_r ищется в виде полинома степени не выше третьей:

$$a_r(T) = S_r(T) = \sum_{m=1}^M S_{mr}(T), \quad (r=0, 1, \dots, n), \quad (4)$$

где функции $S_{mr}(T)$ описывают зависимость коэффициента a_r в поддиапазоне с номером m кубическим сплайном. В остальных поддиапазонах эта функция равна нулю (рис. 2). То есть:

$$S_{mr}(T) = \begin{cases} \sum_{j=0}^3 s_{jmr} T^j & \text{при } T_{m_{min}r} \leq T \leq T_{m_{max}r}; \quad (r=0, 1, \dots, n), \\ 0 & \text{при } T < T_{m_{min}r} \cup T > T_{m_{max}r}, \end{cases} \quad (5)$$

где $T_{m_{min}r}$ и $T_{m_{max}r}$ – соответственно, наименьшая и наибольшая температуры для диапазона с номером m .



Рис. 2. Аппроксимация зависимости коэффициента a_r кубическими сплайнами $S_{mr}(T)$ в различных поддиапазонах. Вне «своего» диапазона функции $S_{mr}(T) = 0$; T_{D_m} – «границные температуры» выбранных диапазонов

При этом функция $S_r(T)$ должна быть непрерывной и иметь первую производную во всем диапазоне $[T_{min}, T_{max}]$. Если положить, что весь диапазон разбивается на поддиапазоны в температурных точках T_{D_m} так, что $T_{min} = T_{1_{min}r}$, $T_{(m-1)_{max}r} = T_{D_{(m-1)}}$, $T_{D_{(m-1)}} = T_{m_{min}r}$, $T_{M_{max}r} = T_{max}$, $m = 2, \dots, M$, то должны выполняться следующие условия на границах поддиапазонов:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{(m-1)r}(T_{(m-1)_{max}r}) = S_{mr}(T_{m_{min}r}); \\ \frac{dS_{(m-1)r}(T_{(m-1)_{max}r})}{dT} = \frac{dS_{mr}(T_{m_{min}r})}{dT}, \end{array} \right. \quad (m=2, 3, \dots, M). \quad (6)$$

Задача заключается в идентификации на основе полученных экспериментальных данных математической модели выходного сигнала ПДД (2) и (3), когда математические модели коэффициентов регрессии задаются соотношениями (4), (5) и удовлетворяют граничным условиям (6).

3.2. Решение уравнений идентификации ДД. На первом этапе процедуры идентификации для каждой заданной температуры из установленного диапазона $T_j \in [T_{min}, T_{max}]$, ($j = 0, 1, \dots, N_T$; $T_0 = T_{min}$, $T_{N_T} = T_{max}$) поиск оценок коэффициентов регрессии модели (2) производится стандартными методами, широко используемыми в математической статистике [36, 37]. В результате получаются оценки коэффициентов $a_0(T_j)$, $a_1(T_j)$, ..., $a_n(T_j)$. Эти оценки заносятся в таблицу (таблица 1) и являются основой для второго этапа идентификации. Для упрощения задачи идентификации диапазон $[T_{min}, T_{max}]$ разбивается на одни и те же поддиапазоны для каждого коэффициента регрессии $a_r(T_j)$. Желтым цветом выделен поддиапазон номер m .

На втором этапе процедуры идентификации зависимости каждого коэффициента регрессии a_r ($r = 0, 1, \dots, n$) от температуры осуществляется аппроксимация с помощью кубических сплайнов (4) с учетом граничных условий (5) и (6). При этом предполагается, что в каждый из выбранных поддиапазонов попадает не менее пяти значений температуры. Внутри каждого поддиапазона коэффициенты соответствующего кубического сплайна находятся в соответствии с взвешенным МНК, а веса оценок из таблицы 1 находятся при поиске коэффициентов регрессии (2) из анализа соответствующих матриц ошибок [37].

Пусть в поддиапазоне с номером m ($m = 1, 2, \dots, M$) зависимость коэффициента регрессии a_r ($r = 0, 1, \dots, n$) аппроксимируется кубическим сплайном:

$$a_{rm}(T) = S_{rm}(T) = s_{0rm} + s_{1rm} \cdot T + s_{2rm} \cdot T^2 + s_{3rm} \cdot T^3.$$

Тогда коэффициенты s_{jrm} должны удовлетворять следующей системе линейных уравнений (для упрощения записи индекс r в дальнейшем опущен и подразумевается, что речь идет об аппроксимации зависимости от температуры коэффициента a_r):

Таблица 1

Оценки коэффициентов полиномиальной регрессии (1) для выбранных температур из диапазона $[T_{\min}, T_{\max}]$.

Температура	Номер коэффициента регрессии			
	0	1	...	n
T_{\min}	$a_0(T_{\min})$	$a_1(T_{\min})$	...	$a_n(T_{\min})$
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
$T_{D(m-1)}$	$a_0(T_{D(m-1)})$	$a_1(T_{D(m-1)})$	...	$a_n(T_{D(m-1)})$
$T_{m_{\min}+1}$	$a_0(T_{m_{\min}+1})$	$a_1(T_{m_{\min}+1})$	...	$a_n(T_{m_{\min}+1})$
$T_{m_{\min}+2}$	$a_0(T_{m_{\min}+2})$	$a_1(T_{m_{\min}+2})$	...	$a_n(T_{m_{\min}+2})$
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
$T_{m_{\max}-1}$	$a_0(T_{m_{\max}-1})$	$a_1(T_{m_{\max}-1})$	...	$a_n(T_{m_{\max}-1})$
T_{D_m}	$a_0(T_{D_m})$	$a_1(T_{D_m})$	...	$a_n(T_{D_m})$
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
T_{\max}	$a_0(T_{\max})$	$a_1(T_{\max})$	...	$a_n(T_{\max})$

$$a_m(T_j) = \sum_{i=1}^3 s_{im} T_j^i, \quad (j = m_{\min}, m_{\min}+1, \dots, m_{\max}; m = 1, 2, \dots, M). \quad (7)$$

Всего в системе (7) $4M$ неизвестных коэффициентов s_{im} , которые в силу граничных условий (6) должны удовлетворять следующей системе линейных ограничений:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^3 s_{i(m-1)} T_{D(m-1)}^i = \sum_{i=0}^3 s_{im} T_{D(m-1)}^i; & (m=2, 3, \dots, M), \\ s_{1(m-1)} + 2s_{2(m-1)} T_{D(m-1)} + 3s_{3(m-1)} T_{D(m-1)}^2 = s_{1m} + 2s_{2m} T_{Dm} + 3s_{3m} T_{Dm}^2, \end{cases} \quad (8)$$

В результате получилась классическая задача поиска оценок неизвестных коэффициентов системы линейных уравнений (6) взвешенным МНК при наличии линейных ограничений (7), которая решается известными методами [38]. На основании решения находятся оценки всех коэффициентов кубических сплайнов, которые запоминаются в памяти микропроцессора ПДД и используются для уточнения показаний датчика в процессе измерений.

4. Идентификация моделей реальных ПДД. С целью проверки разработанной методики идентификации моделей ПДД, обеспечивающей компенсацию их температурной погрешности, были проведены экспериментальные исследования, по результатам которых строились градуировочные зависимости рабочих характеристик МЭМ ПДД, выпускаемых ЭОКБ «Сигнал», от давления и температуры.

4.1. Описание экспериментальной установки. В рамках решения поставленной задачи была создана автоматизированная система контроля технологических процессов и испытания ПДД в нормальных и экстремальных климатических условиях [19, 22, 25]. На рис. 3 показаны внешний вид и упрощенная структурная схема этой системы.

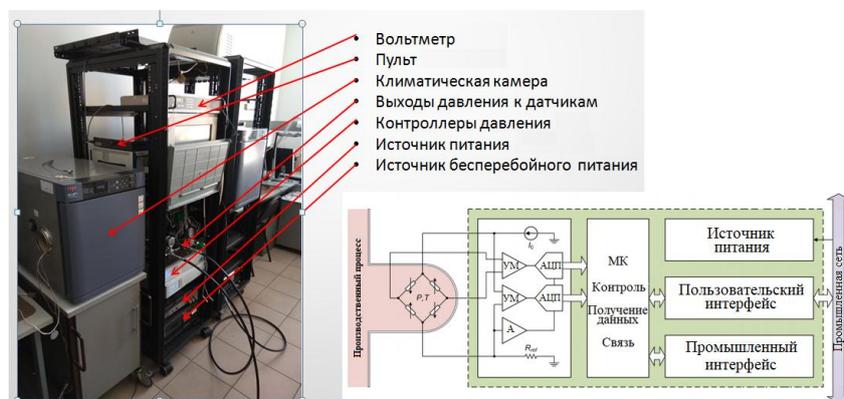


Рис. 3. Автоматизированная система градуировки ПДД и ее упрощенная структурная схема

Основные функции системы: 1) управление технологическим оборудованием; 2) сбор/обработка данных; 3) электрическое питание ПДД; 4) задание требуемого давления и обеспечение необходимой для испытаний температуры; 5) ввод/отображение информации.

В состав аппаратной части системы входят: 1) *PXI 1042* – стойка (вмещает восемь слотов) с интегрированным контроллером на базе процессора *Intel* с предустановленной ОС *Windows 10*; 2) модуль интерфейса *Arinc 429 PXI 429-3U-16*; 3) вакуумный насос *BECKER U-3.6*; 4) задатчик давления *Mensor CPC8000* – осуществляет подачу испытательного давления на ДД; 5) климатические камеры (камера тепла *ESPEC PNH-101M*, камера холода *ESPEC MC-811*) – задают требуемые значения испытательных температур; 6) программируемый источник питания (АКИП 1118) – обеспечивает питание ПДД, проходящих исследование; 7) коллектор – осуществляет распределение испытательного давления между определенным числом ПДД.

Различные температуры окружающей среды устанавливались в диапазоне от $T_{min} = -60^{\circ}\text{C}$ до $T_{max} = 145^{\circ}\text{C}$ с шагом 5°C , когда датчики помещаются в камеры холода или нагревательные печи. При каждой из указанных температур давление изменялось с равномерным шагом $0,35$ атм от $P_{min} = 0,1$ атм до $P_{max} = 7,1$ атм. Для каждой установленной температуры производится измерение давлений из заданного диапазона. При этом в каждой выбранной точке давление измерялось несколько раз, когда давление сначала повышалось от P_{min} до P_{max} , а потом понижалось от P_{max} до P_{min} . Типичные результаты измерений сигнала на выходе датчика показаны в табл. 2.

Таблица 2

Типичные данные измерения на выходе ПДД

U , В	P , атм	U , В	P , атм
0,00003125	0,1	2,97066406	1,15
0,00003125		2,97063281	
0,00000010		2,97070313	
0,00003125		2,97070313	
0,00003125		2,97070313	

4.2. Результаты экспериментального исследования. Для всех выбранных температур из указанного диапазона на основании снятых данных строились полиномиальные зависимости (2) с помощью специально разработанного программного обеспечения. В качестве сигнала U брались средние значения напряжений с выхода датчика при соответствующих давлении и температуре (усреднение проводилось по пяти значениям сигнала, как показано в табл. 2). В результате проведенного исследования было установлено, что адекватно зависимость выходного сигнала от измеряемого давления описывается полиномами второго порядка ($n = 2$).

После этого строились зависимости коэффициентов регрессии a_r ($r = 0, 1, 2$) от температуры с помощью кубических сплайнов (4)–(8) по методике, изложенной в разделе 3 (рис. 4). Для этого тоже было разработано специальное программное обеспечение. В качестве примера на рис. 6 показан характерный вид зависимости коэффициента a_1 от температуры, когда в каждом из трех выделенных поддиапазонов она аппроксимируется кубическим сплайном.

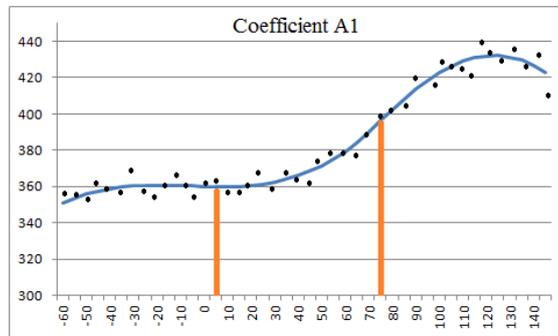


Рис. 6. Аппроксимация коэффициента a_1 в диапазоне от -60 до 140 °С: красные линии – границы трех выбранных поддиапазонов, в которых зависимость аппроксимируется соответствующим кубическим сплайном, черные точки – оценки коэффициента a_1 для различных температур

Анализ полученных оценок коэффициентов a_r при различных температурах из заданного диапазона показал, что этот диапазон можно разбить на три поддиапазона ($M = 3$) одинакового размера. Тогда каждый из поддиапазонов содержит по 14–15 значений температуры. Были выбраны следующие границы поддиапазонов $T_{D_1} = 5^\circ\text{C}$ и $T_{D_2} = 75^\circ\text{C}$.

Для наглядности на рис. 5 показана поверхность распределения отклонений измерительных данных от интерполяционной модели, построенной по описанной методике (2)–(8), когда зависимость от давления описывалась полиномом второго порядка, а зависимости всех коэффициентов данного полинома от давления – кубическими сплайнами.

Из последнего рисунка видно, что относительное отклонение измеренных значений выходного напряжения МЭМ ПДД от предсказанных моделью (2)–(8) не превышает 0,1 % в требуемом диапазоне давлений и температур. Это позволяет проводить измерения давления с точностью, не худшей 0,25 % от измеряемой величины.

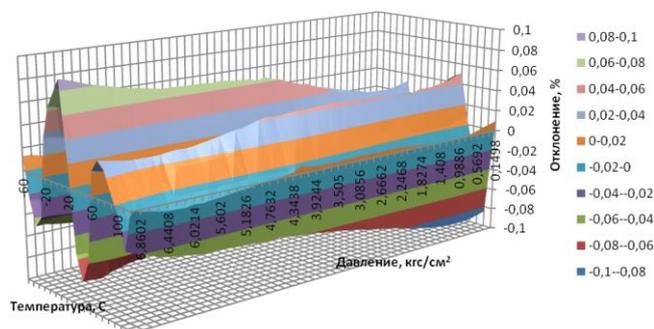


Рис. 5. Распределение ошибок интерполяции в поле давлений и температур

Заключение. В работе исследована методика компенсации влияния температуры на точность измерения давления с помощью МЭМ ПДД, применяемых в авиационной технике. Установлено, что полученная ранее модель [29, 30] выходного сигнала ПДД не позволяет измерять давление с требуемой точностью в диапазоне температур от -60 до 140 °С. По этой причине была использована традиционная полиномиальная модель [27], адекватно описывающая выходной сигнал ПДД в требуемом диапазоне температур.

Для упрощения процедуры обработки экспериментальных данных в ходе идентификации полиномиальной модели и снижения ошибок вычислений предложено использовать описание коэффициентов модели (2) зависимости выходного сигнала от измеряемого давления в форме кубических сплайнов. Подробно описана методика градуировки и получены выражения для расчета неизвестных коэффициентов модели.

Предложенный подход был проверен на реальных МЭМ ПДД, выпускаемых ЭОКБ «Сигал» им. А.И. Глухарева». Полученные результаты показали, что предлагаемая упрощенная методика градуировки позволяет достичь требуемых точностей измерения давления во всем температурном диапазоне, характерном для авиационной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Yozo K.* A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon // IEEE Trans. on Electron Device. – 1982. – No. 29 (1). – P. 64-70.
2. *Boukabache A., Pons R.* Doping effects on thermal behaviour of silicon resistor // Electronics Letters. – 2002. – No. 38 (7). – P. 342-343.
3. *Aljancic U., Resnik D., Vrtacnik D., Mozek M., Amon S.* Temperature effects modeling in silicon piezoresistive pressure sensor // Proc. of the 11-th Mediterranean Electrotechnical Conf., MELECON. – Cairo, Egypt: IEEE, 2002. – P. 36-40.
4. *Ицкович Э.Л.* Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства // Датчики и системы. – 2002. – № 2. – С. 42-47.
5. *Mohamed R.L., Abdelhafid C.* Influence of temperature on the offset voltage of piezoresistive pressure sensors // Int. Conf. on Computational Methods in Science and Engineering. – Corfu, GREECE: AIP, 2007. – P. 25-30.
6. *Chiou J.A., Chen S.* Pressure nonlinearity of micromachined piezoresistive pressure sensors with thin diaphragms under high residual stresses // Sensors and Actuators: Ser. A – Physical. – 2008. – No. 147 (1). – P. 332-339.
7. *Frantlović M., Jokić I., Lazio Ž., Vukelić B., Obradov M., Vasiljević-Radović D.* Temperature measurement using silicon piezoresistive MEMS pressure sensors // Proc. of the 29th Int. Conf. on Microelectronics MIEL. – Belgrade, Serbia: IEEE, 2014. – P. 159-161.

8. *Першенков П.П., Тюрин Е.А., Баширов О.В.* Интеллектуальные датчики в системе измерения давления // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 1. – Пенза: ПГУ, 2009. – С. 451-452.
9. *Fraga M.A., Koberstein L.L.* An Overview on the Modeling of Silicon Piezoresistive Pressure Microsensors // 2012 Workshop on Engineering Applications (WEA). – Bogota, Columbia, 2012. – DOI: 10.1109/WEA.2012.6220091.
10. *Львов А.А., Коновалов Р.С.* Высокотемпературные датчики давления // Надежность и качество: Тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза, ПГУ, 2014. – С. 48-50.
11. *Коновалов Р.С., Львов П.А., Львов А.А.* Повышение точности пьезорезистивных датчиков давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 149-158.
12. *Львов А.А., Коновалов Р.С.* Малогабаритные датчики давления на основе кремниевых поликристаллических структур с диэлектрической изоляцией // Датчики и системы. – 2015. – № 8 (195). – С. 29-32.
13. *Nie M., Gao Y.* The analytical calibration model of temperature effects on a silicon piezoresistive pressure sensor // AIP Advances. – 2017. – No. 7. – P. 111-117.
14. *Львов А.А., Львов П.А., Светлов М.С., Кузин С.А.* Распределенная система датчиков для авионики, управляемая по беспроводному радиоканалу // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 1. – Пенза: ПГУ, 2017. – С. 100-103.
15. *Дробынин М.Е., Львов П.А., Львов А.А., Торопова О.А.* Компенсация температурной погрешности пьезорезистивных датчиков давления с помощью полумостовой схемы: анализ метода // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза: ПГУ, 2018. – С. 85-88.
16. *Дробынин М.Е., Львов П.А., Львов А.А., Торопова О.А.* Компенсация температурной погрешности пьезорезистивных датчиков давления с помощью полумостовой схемы: результаты эксперимента // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза: ПГУ, 2018. – С. 409-413.
17. *Tan Y.Y., Hong Y.U., Huang Q.A., Liu T.Q.* Effect of temperature on the Young's modulus of silicon nano-films // Chinese J. of Electron Devices. – 2007. – No. 30 (3). – P. 755-758.
18. *Scripal E.N., Ermakov R.V., Gutcevitch D.E., L'vov A.A., Sytnik A.A.* Test Methods and Results of the MEMS Inertial Sensors // Proc. 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia, 2018. – P. 1000-1003.
19. *Doelle M.B.* Temperature Extraction from a Pressure Sensor. – US Patent No. 8,082,796 B1. – Silicon Microstructures Inc., USA, 2011.
20. *Akbar M., Shanblatt M.A.* Temperature Compensation of Piezoresistive Pressure Sensors // Sensors and Actuators. – 1992. – Vol. 33, No. 3. – P. 155-162.
21. *Peng K.H., Uang C.M.* The Temperature Compensation of the Silicon Piezo-Resistive Pressure Sensor Using the Half-Bridge Technique // Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5343. – P. 292-301.
22. *Коновалов Р.С., Львов П.А., Львов А.А., Кузин С.А.* Пьезорезонансный датчик давления повышенной точности // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 142-149.
23. *Gridchin V.A., Kononov R.S., L'vov A.A., Afanasiev M.Y., Danilova O.G.* A Piezoresistive Pressure Sensor Based on Polysilicon Thin Films with Dielectric Insulation // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 191-199.
24. *Kay A., Ivanov M., Schaffer V.* A Practical Technique for Minimizing the Number of Measurements in Sensor Signal Conditioning Calibration // Texas Instruments. Application Rep. SBOA111. – Dallas: Texas Instruments, 2005. – 9 p.
25. *Коновалов Р.С., Львов П.А., Львов А.А., Кузин С.А., Булыкин Д.А.* Аппаратное и алгоритмическое обеспечение интеллектуального пьезорезонансного датчика давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 158-164.
26. *Николаенко А.Ю., Львов А.А., Львов П.А., Коновалов Р.С., Хаустов В.В.* Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (77). – С. 154-160.
27. *Николаенко А.Ю., Львов А.А., Львов П.А.* Компенсация температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления // Надежность и качество: Сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза: ПГУ, 2014. – С. 57-59.

28. Дробынин М.Е., Ясюк Н.А., Львов П.А., Ивженко С.П. Исследование микроэлектромеханических кремниевых интеллектуальных датчиков давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. конф. – Саратов: ООО СОП "Лоди", 2019. – С. 293-300.
29. Ясюк Н.А., Дробынин М.Е., Шпрехер М.И., Светлова Э.М., Ивженко С.П., Львов П.А. Исследование влияния температурных эффектов на работу пьезорезистивного датчика давления // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. IX Всерос. науч. конф. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 578-589.
30. Дробынин М.Е., Львов П.А., Ивженко С.П., Торопова О.А. Математическая модель температурных эффектов в кремниевом пьезорезистивном датчике давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. конф. – Саратов: ООО СОП "Лоди", 2019. – С. 384-390.
31. L'vov A., L'vov P., Konovalov R. Improvement of Piezoresistive Pressure Sensor Accuracy by Means of Current Loop Circuit Using Optimal Digital Signal Processing // Proc. of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016. – P. 279-282.
32. Львов А.А., Гуреев В.В., Пыльский В.А., Шевченко А.А. Применение формирователя сигнала параметрических датчиков «токовая петля» для измерения температуры // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (50). – С. 17-20.
33. L'vov P.A., Konovalov R.S., Kuzin S.A., L'vov A.A. The Use of Current Loop Circuit as a Signal Conditioner for High Accuracy Digital Piezoresistive Pressure Sensors // Proc. of the 2016 Int. Conf. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, Russia, 2016. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819039.
34. Кузин С.А., Львов П.А., Львов А.А., Светлов М.С. Повышение точности емкостных датчиков давления для авиакосмической техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3 (188). – С. 29-42.
35. Козлов П.Н., Мельникова Н.И., Львов А.А. Построение математической модели датчика давления методом интерполяции бикубическими сплайнами // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: Сб. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: Наука, 2018. – С. 342-347.
36. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 336 с.
37. Мусатов М.В., Львов А.А. Анализ моделей метода наименьших квадратов и методов получения оценок // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Вып. 4. – № 2 (43). – С. 137-140.
38. Вучков И.Н., Бояджиева Л.Н., Солаков Е.Б. Прикладной линейный регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 239 с.

REFERENCES

1. Yozo K. A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon, *IEEE Trans. on Electron Device*, 1982, No. 29 (1), pp. 64-70.
2. Boukabache A., Pons R. Doping effects on thermal behaviour of silicon resistor, *Electronics Letters*, 2002, No. 38 (7), pp 342-343.
3. Aljancic U., Resnik D., Vrtacnik D., Mozek M., Amon S. Temperature effects modeling in silicon piezoresistive pressure sensor, *Proc. of the 11-th Mediterranean Electrotechnical Conf., MELECON*. Cairo, Egypt: IEEE, 2002, pp. 36-40.
4. Itskovich E.L. Sovremennye intellektual'nye datchiki obshchepromyshlennogo naznacheniya, ih osobennosti i dostoinstva [Modern intelligent sensors for general industrial purposes, their features and advantages], *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2002, No. 2, pp. 42-47.
5. Mohamed R.L., Abdelhafid C. Influence of temperature on the offset voltage of piezoresistive pressure sensors, *Int. Conf. on Computational Methods in Science and Engineering*. Corfu, GREECE: AIP, 2007, pp. 25-30.
6. Chiou J.A., Chen S. Pressure nonlinearity of micromachined piezoresistive pressure sensors with thin diaphragms under high residual stresses, *Sensors and Actuators: Ser. A – Physical*, 2008, No. 147 (1), pp. 332-339.

7. Frantlović M., Jokić I., Lazio Ž., Vukelić B., Obradov M., Vasiljević-Radović D. Temperature measurement using silicon piezoresistive MEMS pressure sensors, *Proc. of the 29th Int. Conf. on Microelectronics MIEL*. Belgrade, Serbia: IEEE, 2014, pp. 159-161.
8. Pershenkov P.P., Tyurin E.A., Bashkirov O.V. Intellektual'nye datchiki v sisteme izmereniya davleniya [Intelligent sensors in the pressure measurement system], *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 1. Penza: PGU, 2009, pp. 451-452.
9. Fraga M.A., Koberstein L.L. An Overview on the Modeling of Silicon Piezoresistive Pressure Microsensors, *2012 Workshop on Engineering Applications (WEA)*. Bogota, Columbia, 2012. DOI: 10.1109/WEA.2012.6220091.
10. L'vov A.A., Konovalov R.S. Vysokotemperaturnye datchiki davleniya [High temperature pressure sensors], *Nadezhnost' i kachestvo: Tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 2. Penza, PGU, 2014, pp. 48-50.
11. Konovalov R.S., L'vov P.A., L'vov A.A. Povyshenie tochnosti p'ezorezistivnykh datchikov davleniya [Accuracy improvement of piezoresistive pressure sensors], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the IV International Scientific Conference]: in 2 vol. Vol. 2. Saratov: Izdat. dom «Rayt-Ekspo», 2015, pp. 149-158.
12. L'vov A.A., Konovalov R.S. Malogabaritnye datchiki davleniya na osnove kremnievykh polikristalicheskikh struktur s dielektricheskoy izolyatsiei [Small-sized pressure sensors based on silicon polycrystalline structures with dielectric isolation], *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2015, No. 8 (195), pp. 29-32.
13. Nie M., Gao Y. The analytical calibration model of temperature effects on a silicon piezoresistive pressure sensor, *AIP Advances*, 2017, No. 7, pp. 111-117.
14. L'vov A.A., L'vov P.A., Svetlov M.S., Kuzin S.A. Raspredeleonnaya sistema datchikov dlya avioniki, upravlyаемая по беспроводному радиоканалу [Distributed wirelessly controlled sensor system for avionics], *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 1. Penza: PGU, 2017, pp. 100-103.
15. Drobynin M.E., L'vov P.A., L'vov A.A., Toropova O.A. Kompensatsiya temperaturnoy pogreshnosti p'ezorezistivnykh datchikov davleniya s pomoshch'yu polumostovoy skhemy: analiz metoda [Temperature error compensation of piezoresistive pressure sensors using a half-bridge circuit: analysis of the method], *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 2. Penza: PGU, 2018, pp. 85-88.
16. Drobynin M.E., L'vov P.A., L'vov A.A., Toropova O.A. Kompensatsiya temperaturnoy pogreshnosti p'ezorezistivnykh datchikov davleniya s pomoshch'yu polumostovoy skhemy: rezul'taty eksperimenta [Temperature error compensation of piezoresistive pressure sensors using a half-bridge circuit: experimental results] *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 2. Penza: PGU, 2018, pp. 409-413.
17. Tan Y.Y., Hong Y.U., Huang Q.A., Liu T.Q. Effect of temperature on the Young's modulus of silicon nano-films, *Chinese J. of Electron Devices*, 2007, No. 30 (3), pp. 755-758.
18. Scripal E.N., Ermakov R.V., Gutcevitch D.E., L'vov A.A., Sytnik A.A. Test Methods and Results of the MEMS Inertial Sensors, *Proc. 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.* St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 1000-1003.
19. Doelle M.B. Temperature Extraction from a Pressure Sensor. US Patent No. 8,082,796 B1. Silicon Microstructures Inc., USA, 2011.
20. Akbar M., Shanblatt M.A. Temperature Compensation of Piezoresistive Pressure Sensors, *Sensors and Actuators*, 1992, Vol. 33, No. 3, pp. 155-162.
21. Peng K.H., Uang C.M. The Temperature Compensation of the Silicon Piezo-Resistive Pressure Sensor Using the Half-Bridge Technique, *Proc. of SPIE*, 2004, Vol. 5343, pp. 292-301.
22. Konovalov R.S., L'vov P.A., L'vov A.A., Kuzin S.A. P'ezorezonansnyy datchik davleniya povyshennoy tochnosti [Problems of control, information processing and transmission], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the IV International Scientific Conference]: in 2 vol. Vol. 2. Saratov: Izdat. dom «Rayt-Ekspo», 2015, pp. 142-149.

23. Gridchin V.A., Konovalov R.S., L'vov A.A., Afanasiev M.Y., Danilova O.G. A Piezoresistive Pressure Sensor Based on Polysilicon Thin Films with Dielectric Insulation, *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the IV International Scientific Conference]: in 2 vol. Vol. 2. Saratov: Izdat. dom «Rayt-Ekspo», 2015, pp. 191-199.
24. Kay A., Ivanov M., Schaffer V. A Practical Technique for Minimizing the Number of Measurements in Sensor Signal Conditioning Calibration, *Texas Instruments. Application Rep. SBOA111*. Dallas: Texas Instruments, 2005, 9 p.
25. Konovalov R.S., L'vov P.A., L'vov A.A., Kuzin S.A., Bulykin D.A. Apparatoe i algoritmicheskoe obespechenie intellektual'nogo p'ezorezonansnogo datchika davleniya [Hardware and algorithmic support of an intelligent piezoresonance pressure sensor], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of control, information processing and transmission: Proceedings of the IV International Scientific Conference]: in 2 vol. Vol. 2. Saratov: Izdatel'skiy dom «Rayt-Ekspo», 2015, pp. 158-164.
26. Nikolaenko A.Yu., L'vov A.A., L'vov P.A., Konovalov R.S., Haustov V.V. Metodika kompensatsii temperaturnoy pogreshnosti intellektual'nyh datchikov davleniya [Technique for compensating temperature error of smart pressure sensors], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2014, No. 4 (77), pp. 154-160.
27. Nikolaenko A.Yu., L'vov A.A., L'vov P.A. Kompensatsiya temperaturnoy pogreshnosti intellektual'nyh datchikov davleniya [Temperature Compensation for Smart Pressure Sensors], *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. tr. Mezhdunar. simp.* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium]: in 2 vol. Vol. 2. Penza: PGU, 2014, pp. 57-59.
28. Drobynin M.E., YAsyuk N.A., L'vov P.A., Ivzhenko S.P. Issledovanie mikroelektromekhanicheskikh kremnievyykh intellektual'nyh datchikov davleniya [Investigation of microelectromechanical silicon intelligent pressure sensors], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Saratov: OOO SOP "Lodi", 2019, pp. 293-300.
29. Yasyuk N.A., Drobynin M.E., Shprekher M.I., Svetlova E.M., Ivzhenko S.P., L'vov P.A. Issledovanie vliyaniya temperaturnyykh effektiv na rabotu p'ezorezistivnogo datchika davleniya [Investigation of the effect of temperature effects on the operation of a piezoresistive pressure sensor], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. tr. IX Vseros. nauch. konf.* [System synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the IX All-Russian Scientific Conference]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 578-589.
30. Drobynin M.E., L'vov P.A., Ivzhenko S.P., Toropova O.A. Matematicheskaya model' temperaturnyykh effektivov v kremnievom p'ezorezistivnom datchike davleniya [Mathematical model of temperature effects in a silicon piezoresistive pressure sensor], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of management, processing and transmission of information: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Saratov: OOO SOP "Lodi", 2019, pp. 384-390.
31. L'vov A., L'vov P., Konovalov R. Improvement of Piezoresistive Pressure Sensor Accuracy by Means of Current Loop Circuit Using Optimal Digital Signal Processing, *Proc. of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.* St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016, pp. 279-282.
32. L'vov A.A., Gureev V.V., Pyl'skiy V.A., Shevchenko A.A. Primenenie formirovatel'nykh signalov parametricheskikh datchikov «tokovaya petlya» dlya izmereniya temperatury [Application of a signal conditioner of parametric sensors "current loop" for temperature measurement], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2010, No. 4 (50), pp. 17-20.
33. L'vov P.A., Konovalov R.S., Kuzin S.A., L'vov A.A. The Use of Current Loop Circuit as a Signal Conditioner for High Accuracy Digital Piezoresistive Pressure Sensors, *Proc. of the 2016 Int. Conf. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, Russia, 2016*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819039.
34. Kuzin S.A., L'vov P.A., L'vov A.A., Svetlov M.S. Povyshenie tochnosti emkostnykh datchikov davleniya dlya aviakosmicheskoy tekhniki [Improving the Accuracy of Capacitive Pressure Sensors for Aerospace Applications], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3 (188), pp. 29-42.

35. Kozlov P.N., Mel'nikova N.I., L'vov A.A. Postroenie matematicheskoy modeli datchika davleniya metodom interpolyatsii bikubicheskimi splaynami [Construction of a mathematical model of a pressure sensor by interpolation with bicubic splines], *Problemy upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemah: Sb. tr. XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Problems of management in socio-economic and technical systems: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference]. Saratov: Nauka, 2018, pp. 342-347.
36. Linnik Yu.V. Metod naimen'shih kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudeniy [Least squares method and the basics of observation processing theory]. Moscow: GIFML, 1958, 336 p.
37. Musatov M.V., L'vov A.A. Analiz modeley metoda naimen'shih kvadratov i metodov polucheniya otsenok [Analysis of Least Squares Models and Estimation Methods], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2009, No. 2 (43), Issue 4, pp. 137-140.
38. Vuchkov I.N., Boyadzhieva L.N., Solakov E.B. Prikladnoy lineynyy regessionnyy analiz [Applied linear regression analysis]. Moscow: Finansy i statistika, 1987, 239 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Д.А. Зимняков.

Дробынин Михаил Евгеньевич – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; e-mail: misha-q@mail.ru; г. Саратов, Россия; аспирант.

Аль-Тай Омар Давуд Мохаммед – e-mail: altai_omar@mail.ru; аспирант.

Филина Екатерина Владимировна – e-mail: ekaterinafilinav@gmail.com; аспирантка.

Львов Петр Алексеевич – Энгельское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева; e-mail: peter.lvov@gmail.com; г. Энгельс-19, Россия; к.т.н.; нач. отдела.

Кузин Сергей Александрович – e-mail: kuzinsa@mail.ru; нач. сектора;

Drobynin Mikhail Evgen'evich – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: misha-q@mail.ru; Saratov, Russia; postgraduate student.

Al-Tai Omar Davud Mokhammed – e-mail: altai_omar@mail.ru; postgraduate student.

Filina Ekaterina Vladimirovna – e-mail: ekaterinafilinav@gmail.com; postgraduate student.

L'vov Peter Alexeevich – OJSC "Signal" Engels Design Bureau named after A.I. Glukharev; e-mail: peter.lvov@gmail.com; Engels-19, Russia; cand. of eng. sc.; department head.

Kuzin Sergey Alexandrovich – e-mail: kuzinsa@mail.ru; research sector head.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-83-93

А.Л. Ляшенко

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА

Рассмотрена необходимость регулирования температуры теплоносителя в гидравлических прессах, обеспечивающих горячее склеивание фанеры, регулирование давления в каналах пресса и поддержания технологических параметров на заданном уровне. В качестве объекта управления рассмотрен колонный гидравлический пресс П-714-Б для горячего склеивания фанеры, установленный на Усть-Ижорском фанерном комбинате. В статье представлено описание колонного гидравлического пресса. Для мониторинга параметров представленной установки фанерного производства, предлагается рассмотреть нагревательные плиты пресса и пакеты фанеры как объект с распределенными параметрами. Для разработки математической модели объекта управления была рассмотрена функциональная схема данного устройства с основным оборудованием и технологическими потоками теплоносителя. Разработана методика моделирования объектов данного класса как объектов с распределёнными параметрами. Рассмотрение процессов, протекающих в ка-