

ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Коновалов Р.С., аспирант; Львов А.А., проф., д.т.н.

(Энгельское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева, г. Энгельс, Россия)

Развитие авиационной техники является одной из приоритетных задач любого государства. Неотъемлемой составной частью всех авиационных транспортных средств являются датчики давления, температуры и перемещения. Наиболее востребованными в авиационной технике являются датчики давления (далее ДД) для топливных и гидравлических систем. Одной из задач, с которыми сталкиваются разработчики при проектировании датчиковой аппаратуры, является сохранение работоспособности и заданных технических характеристик при воздействии различных дестабилизирующих факторов внешней среды (таблица 1), возникающих при эксплуатации ДД.

Таблица 1 – Основные воздействующие факторы

Воздействующий фактор	Характеристика воздействующего фактора	Значение воздействующего фактора
Пониженная температура окружающей среды	Рабочая, °С	Минус 55
	Предельная, °С	Минус 65
Повышенная температура окружающей среды	Рабочая, °С	125
	Предельная, °С	200
Акустический шум	Диапазон частот, Гц	10000
	Уровень звукового давления, дБ	150
Случайная широкополосная вибрация	Диапазон частот, Гц	500-2000
	Спектральная плотность виброускорения, $g^2/Гц$	0,025

При воздействии указанных в таблице 1 факторов ДД должны преобразовывать давление измеряемой агрессивной среды в аналоговый или цифровой выходной сигнал. При этом предел основной погрешности измерения ДД по требованиям разработчиков перспективных объектов авиационной техники снижается с каждым годом и в настоящее время составляет не более 0,15% от верхнего предела измерения (ВПИ).

Разработка соответствующих указанным требованиям ДД, применяемым в силовых установках, гидравлических и топливных системах нового поколения, требует нового подхода к проектированию датчиковой аппаратуры.

В настоящее время реализовано множество типов ДД, в которых использованы различные принципы преобразования абсолютного и избыточного давления измеряемой среды (пьезорезистивный, пьезоэлектрический, ёмкостной, резонансный и др.) в выходной сигнал.

Пьезорезистивный метод [1] преобразования давления относится к наиболее перспективным методам, позволяющим создать серийно выпускаемые ДД для авиационной техники, удовлетворяющие заложенным техническим требованиям.

Использование в конструкции ДД пьезорезистивных преобразователей с сформированными пьезорезисторами, включенными по схеме моста Уитстона, которые изолированы с помощью *p-n*-переходов, ограничивает применение данного типа ДД на высоких температурах. Граница верхнего предела температуры для кремниевых преобразователей составляет +125°С. Такое ограничение вызвано шириной запрещенной

зоны материала. Для достижения работоспособности ДД с сохранением заданных характеристик на расширенном диапазоне температур до +200°C требуется разработка нового конструктивного исполнения пьезорезистивного преобразователя. В процессе проведения опытно-конструкторской работы, проведенной на базе предприятия ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева, был разработан ДД (Рисунок 1) с применением пьезорезистивного преобразователя из монокристаллического кремния. Технические характеристики разработанного ДД приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики ДД с применением пьезорезистивного преобразователя из монокристаллического кремния

Наименование параметра	Значение
Диапазон измерения давления, кгс/см ² .	От 0,3 до 45
Перегрузочное давление, кгс/см ² абс.	1,5 Рном.
Рабочая температура, °С	От минус 60 до +200 включ.
Погрешность измерения в рабочем диапазоне от верхнего предела диапазона измерения давления (при всех условиях эксплуатации), %, не более:	±0.5
Выходной сигнал, мВ	От 100 до 120
Напряжение питания постоянного тока, мА	4 ±0,2
Вибрация в диапазоне частот от 10...2000Гц	10g

Достижение работоспособности ДД в расширенном температурном диапазоне достигнуто за счет осуществления изоляции тензорезисторов с использованием диэлектрических слоев [3], а не традиционных *p-n*-переходов.

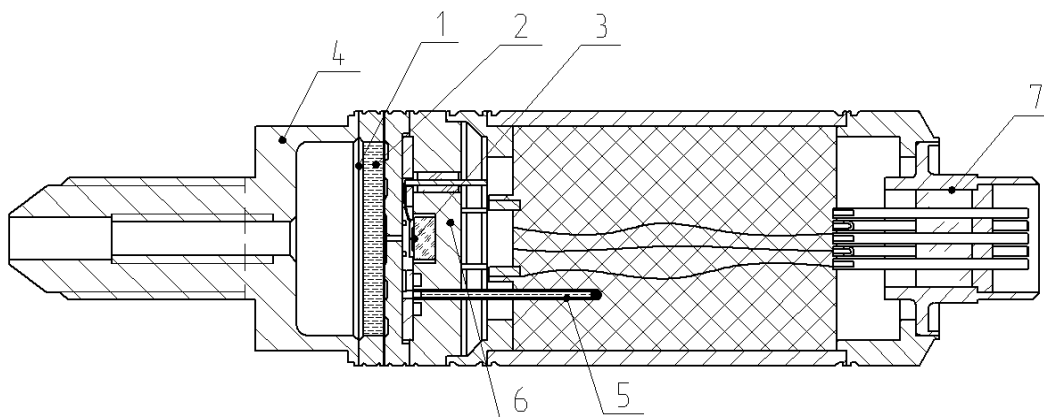


Рисунок 1 – Конструкция датчика давления с применением пьезорезистивного преобразователя из монокристаллического кремния

Конструктивно датчик выполнен в виде моноблока и состоит из интегрального преобразователя (ИП) абсолютного или избыточного давления (3) в зависимости от исполнения, штуцера для монтажа на объект (4), электрического соединителя типа СНЦ (7), защитного кожуха (8), разделительной мембраны (1), трубки для заполнения разделительной жидкостью (5), металлостеклянного корпуса (6) и кремнийорганической жидкости (2).

Интегральный преобразователь (3) выполнен из кремниевого упругого элемента с образованными на нем кремниевых пьезорезистивных структур на диэлектрической изоляции (SiO_2) [3]. Пьезорезисторы сформированы в виде моста Уитстона – электрическая цепь, используемая для измерения сопротивления (рис. 2). Выходной сигнал ($U_{\text{вых}}$) по схеме Уитстона определяется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ПИТ}} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} \quad (1)$$

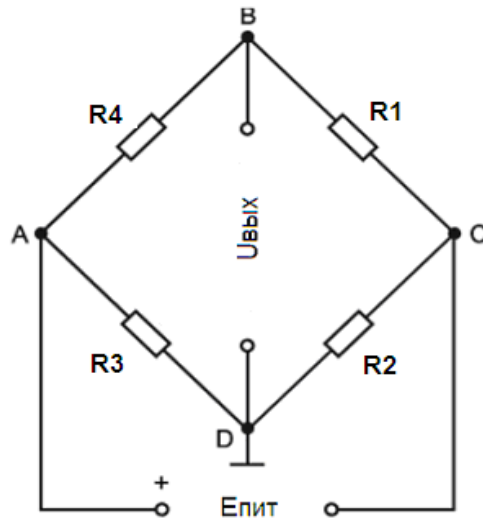


Рисунок 2 – Мостовая схема Уитстона

Из формулы (1) видно, что если все сопротивления в мосту равны, то при подаче питания имеем на выходе нулевой сигнал. Однако на практике сопротивления резисторов лишь относительно равны друг другу, существует малое отклонение от номинального значения. Из-за этого на выходе возникает неприемлемый сигнал, вызванный разбросом сопротивлений, который называется начальным разбалансом моста. Монтаж ИП осуществляется к металлостеклянному корпусу через компенсирующую подложку из стекла (Ругех) для уменьшения влияния напряжений на ИП, возникающих в конструкции датчика от внешних воздействующих факторов (ВВФ). Металлостеклянный корпус (6) изготовлен из коррозионностойкой стали, по температурному коэффициенту линейного расширения приближенной к стеклу. В корпусе с помощью металлостеклянного спая вакуумноплотно вмонтированы электро-выводы для соединения ИП с электрическим соединителем (7).

Для защиты ИП от воздействия агрессивной среды к корпусу (6) методом лазерной сварки приварена мембрана из коррозионностойкой стали.

Геометрические размеры мембраны и её ход при изменении измеряемого давления определяются по формулам (2,3).

$$W_m = A_p \cdot P_{\text{ном}} \cdot R_n^4 / (E \cdot h^3), \quad (2)$$

где W_m – ход мембраны, мм; R_n – наружный радиус мембраны, мм; r_o – радиус жёсткого центра, мм; $E = 1820000 \text{ кгс/см}^2$ – модуль упругости; $P_{\text{ном}}$ – номинальное давление, кгс/см^2 ; h – толщина мембраны, мм.

$$A_p = 3(1 - \mu^2)(k^4 - 4k^2 \ln k - 1)/(16k^4), \quad k = R_n / r_n \quad (3)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

В качестве передаточного звена от измеряемой среды к ИП выбрана полиметилсилоксановая жидкость (ПМС) 20р, коэффициент её температурного расширения приблизительно равен с температурным коэффициентом расширения корпуса. ПМС широко используется в технике, благодаря высокой теплопроводности и химической инертности. Заполнение разделительной жидкостью ПМС производилось в высоком вакууме (1×10^{-4} мм.рт.ст.) через впаянную в корпус (6) стальную трубку (5). Предварительно перед заполнением жидкость ПМС необходимо дегазировать при температуре $+60^\circ\text{C}$ в течении 2 часов.

Разработанная конструкция датчика благодаря наличию диэлектрических слоев в интегральном пьезопреобразователе обеспечивает работоспособность ДД в расширенном

диапазоне рабочих температур (от минус 60⁰С до +200⁰С), смещенном в сторону высоких температур, относительно температурного диапазона традиционных ДД. Другой особенностью датчика является наличие встроенной температурной компенсации чувствительности в ИП при питании от генератора тока.

Изготовленные опытные датчики абсолютного давления подтвердили заявленные характеристики при основных ВВФ на конструкторских испытаниях, проведенных на базе предприятия ОАО ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарёва.

Таблица 3 – Перечень оборудования используемого при проведении испытаний

Наименование приборов(оборудования)	Тип или обозначение	Диапазон измерения	Класс точности, погрешность
Вольтметр	Agilent 34970F	0-30 В	0,005% от ИВ
Задатчик давления	Mensor CPC 6000	0 – 51 бар	0.01% от ВПИ
Источник питания постоянного тока	NI – 4110	0-100В 0-2А	0,15% от ИВ
Камера тепла-холода	ESPEC SU-261	от -60 до +150	±1 ⁰ С

Расчёт отклонения от индивидуальной линейности был проведен на основании соотношения[4]:

$$\gamma = \frac{U_{sr} - U_n}{U_{\max} - U_0} \times 100\% , \quad (4)$$

$$U_{sr} = (U_{pr} + U_{obr}) / 2 \quad (5)$$

$$U_n = U_o + n \cdot (U_{\max} - U_0) / 5 \quad (6)$$

где U_{sr} – среднее значение выходного сигнала; U_{\max} , U_0 – соответственно верхний и нижний пределы измерений выходного сигнала; U_n – линейная расчетная характеристика.

Следующий этап разработки ДД с применением ИП заключается в применение усилительных и корректирующих электрических схем для создания интеллектуального ДД на расширенный температурный диапазон. Наиболее подходящей схемой для реализации поставленной задачи является применения формирователя сигнала параметрических датчиков [4].

Малогабаритные ДД нового поколения разработанные в ОАО ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева и изготовленные с использованием материалов, элементов и комплектующих только отечественного производства, со встроенной термокомпенсацией на всем заявленном диапазоне температур от минус 60⁰С до +200⁰С, позволят провести модернизацию имеющихся и разработать новое поколение систем измерения, контроля, управления и диагностики новейших образцов воздушной техники.

Перечень ссылок

1. Аш Ж и соавторы. Датчики измерительных систем: В2-х книгах. Кн. 1. Пер. с франц. – М.: Мир, 1992.-480 с., ил.
2. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник, москва: техносфера, 206.-592с.
3. В.А. Гридчин, В.М. Любимский. Тензопреобразователь давления.-Патент РФ №2329480 от 20.07.08г.
4. А.А. Львов, В.А. Пыльский. Линейная петлевая схема точной обработки сигналов датчиков. Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2004. - №2 (3). - С. 102-113.
5. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. ГОСТ 22520-85.