

ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ГТД

© 2006 Н.И. Лиманова

Самарский государственный аэрокосмический университет

При контроле рабочих процессов ГТД, возникающих при доводке и во время испытаний двигателя, на одно из первых мест выдвигаются задачи измерения давлений. Большинство процессов сопровождается существенным повышением температур рабочих сред. Современные средства измерения давлений, используемые в автоматизированных системах контроля испытаний ГТД, предназначены для работы в температурном диапазоне до 80°С. Предлагаемый термостабильный датчик давления в отличие от известных обладает повышенной точностью измерений за счет исключения погрешностей, возникающих при возрастании температуры среды, давление которой измеряется. Датчик дает возможность расширить рабочий диапазон температур до 400°С при дополнительной погрешности измерений, не превышающей 0,5%.

В системах контроля и испытаний изделий авиакосмической техники на одном из первых мест стоят задачи измерения давлений. Контроль рабочих процессов ГТД предполагает, например, определение статических давлений воздуха в газоздушном тракте, во входном патрубке, в различных точках гребенки линии совместной работы, давлений масла на входе и выходе двигателя, давлений топлива в контурах форсунок, давлений в гидросистеме реверсивного устройства, а также пульсаций давления в компрессоре ГТД. Большинство процессов, возникающих при доводке и во время испытаний двигателя сопровождается существенным повышением температур рабочих сред внутри и на выходе ГТД. Так, температура масла на входе в двигатель варьируется в пределах от 0 до 100°С, на выходе из двигателя — от 0 до 150°С, а температура воздуха в компрессоре достигает 400°С.

Современные средства измерения давлений Метран-100, Сапфир-22, используемые в автоматизированных системах контроля испытаний изделий авиакосмической техники, предназначены для работы в температурном диапазоне, верхняя граница которого достигает максимум 80°С. Дополнительная погрешность, возникающая при работе датчика в условиях повышенных температур, обусловлена в основном неучтенным прогибом его мембраны, возникающим при повышении температуры. Как известно, величина прогиба мембраны датчика давления в нормальных условиях зависит от величины контролируемого давления рабочей среды.

При повышении температуры за счет изменения модуля упругости E материала чувствительного элемента (ЧЭ) возникает неучтенный дополнительный прогиб Δz_t мембраны. При линейной зависимости E от температуры t величина Δz_t описывается следующим выражением [1]:

$$\Delta z_t = -z \frac{B_E \Delta t}{1 + B_E \Delta t}, \quad (1)$$

где z — прогиб ЧЭ при нормальной температуре t_0 , измеряемый в мм.

Δt — разность температур, $t - t_0$ в °С,

B_E — температурный коэффициент модуля упругости ЧЭ в 1/°С (для металлов B_E берется со знаком минус).

Например, для ЧЭ, выполненных из стали, при нагреве на каждые 10°С значение погрешности при определении прогиба z увеличивается на 0,125%, при нагреве на 50°С — на 0,625%, при 400°С данная погрешность составляет 4,69%, что приводит к такой же ошибке в определении величины контролируемого давления.

Предлагаемый термостабильный датчик давления (ТДД) [2] позволяет повысить достоверность определения давления посредством измерения и учета температуры, влияющей на дополнительный прогиб мембраны. На рис. 1 приведена конструкция и структурная схема ТДД.

ТДД содержит гибкий ЧЭ в виде мембраны 1, жестко закрепленный по контуру внутри обоймы 2 корпуса датчика. В обойме 2 помещены прямо-передающий волоконный жгут 3, состоящий из излучающих 4 и

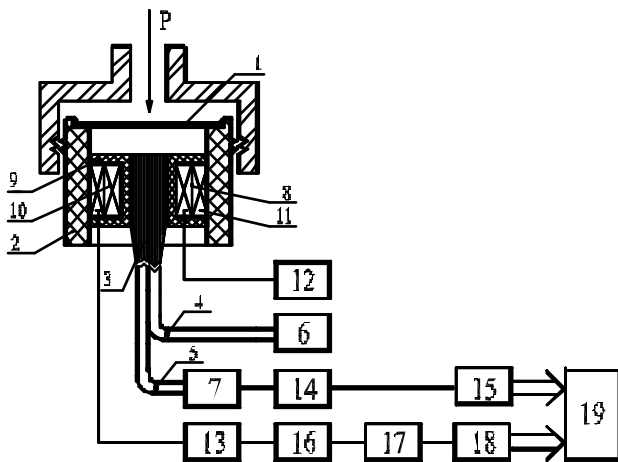


Рис. 1. Конструкция и структурная схема термостабильного датчика давления

приемных 5 волоконных световодов, подключенных, соответственно, к источнику излучения 6 и фотоприемнику 7, вихретоковый преобразователь (ВТП) 8, установленный в каркасе 9 соосно с приемо-передающим жгутом 3. ВТП содержит первичную 10 и вторичную 11 обмотки, подключенные, соответственно, к генератору синусоидального тока 12 и преобразователю параметров ВТП 13. Выход фотоприемника 7 через первый усилитель 14 соединен со входом первого АЦП 15, а выход преобразователя параметров ВТП 13 через второй усилитель 16 и амплитудный детектор 17 подключен ко входу второго АЦП 18. Шины данных и управления первого 15 и второго 18 АЦП соединены с соответствующими входами вычислительного устройства 19.

Принцип работы данного устройства заключается в том, что внутренняя поверхность мембраны освещается светом от источника излучения через излучающие волоконные световоды. Сила давления p рабочей среды ГТД воздействует на ЧЭ 1, вызывая его деформацию, в результате чего изменяется интенсивность света в приемном световоде 5. Прогиб ЧЭ z некоторым образом зависит от напряжения $U_{ФП}$ на выходе фотоприемника 7:

$$z = f(U_{ФП}). \quad (2)$$

В узком диапазоне изменения z зависимость (2) может быть аппроксимирована выражением:

$$z = q_0 + q_1 U_{ФП}, \quad (3)$$

где q_0, q_1 — коэффициенты преобразования. Значение $U_{ФП}$, зависящее от величины избыточного давления, определяется АЦП 15 и регистрируется вычислительным устройством 19. В результате воздействия на ЧЭ повышенных температур возникает дополнительный прогиб мембраны Δz , который приводит к погрешности измерения давления. Действительно, наибольший (в центре ЧЭ) прогиб можно описать как [3]:

$$z = \frac{pR^4}{64D}, \quad (4)$$

где D — жесткость ЧЭ при изгибе;
 p — значение равномерно распределенного по поверхности ЧЭ давления, Па;
 R — радиус ЧЭ, м.
 Жесткость пластины при изгибе определяется следующим образом:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}. \quad (5)$$

Здесь h — толщина ЧЭ, м;
 E — модуль Юнга (упругости) материала ЧЭ, Н/м²;
 μ — коэффициент Пуассона.
 Подставив (5) в (4), для максимального прогиба ЧЭ окончательно получим:

$$z = \frac{3pR^4(1-\mu^2)}{16h^3E}. \quad (6)$$

Отсюда величина p

$$p = \frac{16h^3Ez}{3R^4(1-\mu^2)}. \quad (7)$$

Формула (6) описывает максимальный прогиб в центре мембраны в зависимости от величины приложенного давления при нормальной температуре. Однако, при повышенной температуре наблюдается дополнительный прогиб мембраны, обусловленный зависимостью модуля упругости материала мембраны от температуры, которая описывается следующим выражением [1]:

$$E = E_0 (1 + B_E \Delta t), \quad (8)$$

где E, E_0 — модуль упругости материала при температуре t и при нормальной температуре t_0 , Н/м²;

Подставив выражение (8) в формулу (7), получим значение искомого давления p с учетом температурной зависимости $E(t)$:

$$p = \frac{16 h^2 E_0 (1 + B_E \Delta t) z}{3 R^4 (1 - \mu^2)}. \quad (9)$$

Учитывая, что h, R, E_0, μ — это константы конкретного датчика, выражение (9) можно записать в виде

$$p = K (1 + B_E \Delta t) z, \quad (10)$$

где
$$K = \frac{16 h^2 E_0}{3 R^4 (1 - \mu^2)}.$$

В вычислительном устройстве значение z определяется по зависимостям (2) или (3) и подставляется в (10). Зная температуру ЧЭ, можно внести поправку в формулу (10) и скорректировать дополнительный прогиб мембраны, вызванный повышенной температурой. Для бесконтактного определения температуры ЧЭ в данном устройстве предлагается использовать ВТП 8, так как контактные датчики будут ухудшать свойства мембраны. ЧЭ в данном случае должен выполняться из немагнитного металла, в котором будет возникать вихретоковый эффект.

Корректирующий канал реализован в блоках 13 – 19. На выходе преобразователя параметров ВТП 13 формируется сигнал, зависящий от обобщенного параметра β , который может быть описан следующим образом [4]:

$$\beta = R_{\text{вн}} \sqrt{\omega \sigma \mu_0}, \quad (11)$$

где $R_{\text{вн}}$ — радиус наружной обмотки ВТП, ω — круговая частота тока возбуждения, σ — удельная электрическая проводимость контролируемого материала, вблизи которого находится ВТП, в данном случае мембраны,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

Параметр β , как видно из (11), зависит от величины σ удельной электрической проводимости контролируемого материала, которая в свою очередь определяется линейным температурным коэффициентом сопротивления, проводимостью σ металла при 0°С и температурой. Таким образом, измерив величину проводимости σ при температуре t , можно вычислить температуру нагретого ЧЭ, что и реализуется в предлагаемом датчике.

Амплитудный детектор 17 выделяет амплитуду синусоидального сигнала, величина которого предварительно усиливается вторым усилителем 16 до уровня входного сигнала АЦП 18. В АЦП сигнал ВТП оцифровывается и вводится в вычислительное устройство 19, в котором обрабатывается. Сигнал с выхода фотоприемника 7 после усиления в первом усилителе 14 поступает на вход первого АЦП и после оцифровки вводится в вычислительное устройство 19. В вычислительном устройстве рассчитывается значение измеряемого давления p по величине прогиба мембраны, измеряемого волоконно-оптическим датчиком с учетом дополнительного прогиба, вызванного нагревом ЧЭ.

Таким образом, предлагаемый ТДД в отличие от используемых в настоящее время для контроля рабочих процессов ГТД датчиков давления Метран-100 и Сапфир-22 обладает повышенной точностью измерений за счет исключения погрешностей, возникающих при возрастании температуры среды, давление которой измеряется, а также позволяет определять не только давление, но и температуры контактирующих с мембраной датчика рабочих сред. Кроме того, будучи выполненным в специальном термостойком исполнении, ТДД дает возможность расширить рабочий диапазон температур до 400°С при дополнительной погрешности измерений не превышающей 0,5%, что превосходит характеристики серийно выпускаемых в настоящее время датчиков.

Список литературы

1. Иванова Н.И. Расчеты упругих чувствительных элементов датчиковой аппаратуры. – М.: МЛТИ, 1972. – 139 с.

2. Решение о выдаче патента по заявке N 2005114027/28(016115) от 27.04.2006. Термокомпенсированный датчик давления / Лиманова Н.И., Шишкин П.А., Лышов В.А.

3. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования.

Справочные материалы. М.: Машиностроение, 1965, с. 575.

4. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. Накладные и экранные датчики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.

HIGH TEMPERATURE PRESSURE SENSOR FOR ENGINE WORKING PROCESSES CONTROL

© 2006 N.I. Limanova

Samara State Aerospace University

During the engine tests the working processes control is conducted. Among others such control requires different pressure measurements. The most of the processes are accompanied by the working environment temperatures rise, which may be highly essential. Contemporary means of pressure measurements, which are used in automatic systems for the engine tests control are intended for work in temperature range up to 80⁰C. Unlike known the suggested high temperature pressure sensor ensures precision of measurements at the expense of compensation of errors, which appear during pressures definition at high environment temperature. The sensor permits to widen of temperature range up to 400⁰C. For that the additional measurements error doesn't exceed 0,5%.