

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛОПАТОК ТУРБИН В ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЦЕХОВЫХ УСЛОВИЯХ

© 2011 Е. И. Алексенцев¹, П. А. Шаврин², О. Б. Федосеев²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

²Тольяттинский государственный университет

Рассматривается задача разработки автоматизированной системы контроля геометрии лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) в производственно-цеховых условиях. Отправной точкой проводимого исследования послужило требование технологической преемственности внедряемого оборудования. В ходе теоретического анализа, подкрепляемого результатами моделирования и экспериментальных исследований, обосновывается наилучшая в контексте основной задачи конфигурация автоматизированной системы – модернизация ПОМКЛ путём замены оптико-механической системы контроля быстродействующей измерительной системой с дифференциальными датчиками, интегрированной в вычислительную среду реального времени. В работе представлены эффективные алгоритмы управления и идентификации дифференциального датчика, составляющие основу быстродействующей многоканальной измерительной системы, алгоритмы коррекции влияния кривизны и аналитического описания пера лопатки, приведено описание программно-аппаратной поддержки вычислений в реальном времени. В этом случае ожидаемый показатель «производительность/цена» может достигать значений 150-500 шт. в час/1000\$ при несопоставимой с оптическими системами надежности и неприхотливости оборудования.

Лопатки турбин, геометрические параметры, производственно-цеховые условия, автоматизированная система измерения, технологическая преемственность, модернизация ПОМКЛ, дифференциальные датчики, быстродействующая система управления и идентификации, коррекция влияния кривизны, аналитическое описание поверхности, реальное время, программно-аппаратная поддержка.

Введение

В настоящее время на фоне усиливающейся конкуренции и ужесточения требований международных стандартов особую актуальность приобретает задача разработки универсальной автоматизированной системы контроля геометрии лопаток ГТД в производственно-цеховых условиях.

На сегодняшний день наряду с широко применяемыми для этой цели приборами оптико-механического контроля лопаток (ПОМКЛ) существует целый ряд достаточно оригинальных подходов, в той или иной мере доставляющих решение поставленной задаче. Среди них можно выделить применение метода светового сечения для измерения профиля лопатки [1], а также статистических методов оценки погрешностей базирования усовершенствованных приборов ПОМКЛ-БЛИК [2].

В то же время необходимо отметить несколько обстоятельств, существенно ограничивающих свободу выбора подходов к решению основной задачи. К их числу относятся: требование технологической преемст-

венности внедряемого оборудования, необходимость учета влияния угла закрутки и кривизны поверхности лопатки, необходимость в эффективном согласованном управлении всеми подсистемами и идентификации параметров в условиях сильной неопределенности и при воздействии неконтролируемых возмущений, что, в свою очередь, требует мощной вычислительной поддержки в реальном времени.

Указанные ограничения, по сути, определяют базовую концепцию решения, в основе которого лежит глубокая модернизация ПОМКЛ за счет его оснащения дифференциальными электромеханическими датчиками с быстродействующей системой управления и идентификации, интегрируемой в вычислительную среду Matlab/Simulink с помощью комплекса программно-аппаратных средств реального времени.

В работе представлено решение ключевых задач, определяющих достижимость основного результата. Одной из первых рассматривается задача синтеза системы управления и идентификации дифференциального

электромеханического датчика. Алгоритм основан на преднамеренной организации предельных циклов, ориентированной на восстановление требуемого параметра [3]. Задача оценки и коррекции влияния кривизны для иллюстрации основной идеи предлагаемого решения представлена в упрощенном варианте для случая плоско-параллельных сечений. Завершает работу описание применяемого программно-аппаратного обеспечения. Результаты моделирования и экспериментальных исследований демонстрируют эффективность и потребительские качества измерительной системы. В заключении приводятся необходимые обобщения и оценка перспектив развития предлагаемой концепции.

Алгоритм управления и идентификации дифференциального датчика

Рассмотрим участок измерительной станции ПОМКЛ, оснащенной дифференциальными электромеханическими датчиками, схематичное изображение которого представлено на рис. 1.

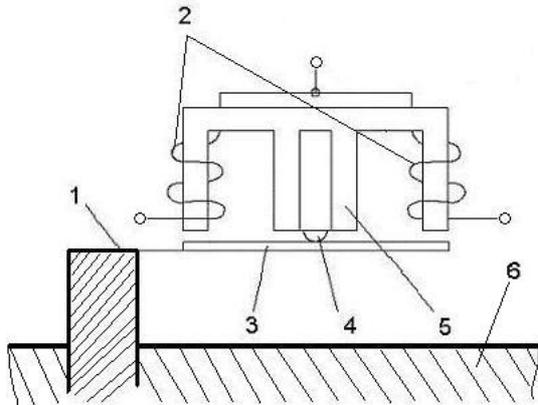


Рис. 1. Схематичное изображение участка измерительной станции, оснащенной дифференциальными электромеханическими датчиками: 1 - измерительный стержень, 2 - катушки датчика, 3 - подвижный якорь, 4 - опора, 5 - сердечник, 6 - стойка измерительной станции

Дополним первичный преобразователь емкостью C , эквивалентной некоторому компенсатору в цепи управления (рис. 2).

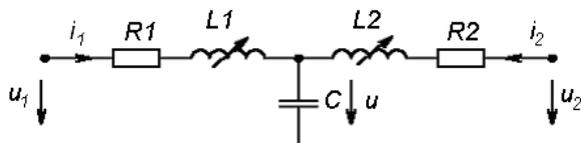


Рис. 2. Схема замещения первичного преобразователя: L_1, L_2 - индуктивности катушек; R_1, R_2 - сопротивления катушек; C - ёмкость; u_1, u_2 - управляющие воздействия

В этом случае дифференциальные уравнения состояния принимают вид:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} = -i_1 R_1 - u + u_1; \\ L_2 \frac{di_2}{dt} = -i_2 R_2 - u + u_2; \\ C \frac{du}{dt} = i_1 + i_2. \end{cases} \quad (1)$$

При малых отклонениях от нейтрального положения якоря индуктивности катушек могут быть представлены в виде

$$\begin{cases} L_1 = L + \Delta L; \\ L_2 = L - \Delta L, \end{cases} \quad (2)$$

где L - индуктивность катушек в нейтральном положении якоря, например, при калибровке; величина ΔL пропорциональна отклонению измерительного стержня от нейтрального положения.

Требуется восстановить значения ΔL по доступным измерениям компонент вектора состояния i_1, i_2, u , в том числе за счет выбора подходящих управлений u_1, u_2 .

С этой целью поставим задачу возбуждения устойчивых автоколебаний в системе (1) с помощью управляющих воздействий u_1, u_2 .

Рассмотрим невозмущенную систему

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = -\frac{u}{L_1}; \\ \frac{di_2}{dt} = -\frac{u}{L_2}; \\ \frac{du}{dt} = \frac{i_1 + i_2}{C}, \end{cases} \quad (3)$$

общее решение которой можно представить в виде

$$\begin{cases} i_1(t) = I_0 + aI \cos \vartheta; \\ i_2(t) = -I_0 + I \cos \vartheta; \\ u(t) = \frac{(1+a)I}{\omega C} \sin \vartheta, \end{cases} \quad (4)$$

где $\vartheta = \omega t + \varphi$; $a = \frac{L_2}{L_1}$; константы I_0, I, φ

определяются начальными условиями.

Выберем управляющие воздействия в виде

$$u_1 = u_2 = c \operatorname{sign}(i_1 + i_2). \quad (5)$$

Принимая решение невозмущенной системы (4) в качестве формул замены пере-

менных, где I_0, I_1, ϑ - новые переменные, и ограничивая правую часть основной гармоникой в предположении $R_1 = R_2 = R$, в результате усреднения находим

$$\begin{cases} \dot{I}_0 = -\frac{2I_0R}{L_1(1+a)}; \\ \dot{I} = -\frac{IR(1+a^2)}{2a(1+a)L_1} + \frac{2c}{\pi aL_1}; \\ \dot{\vartheta} = \omega. \end{cases} \quad (6)$$

В пределе при $t \rightarrow \infty$:

$$\begin{cases} I_0 \rightarrow 0; \\ I \rightarrow \frac{4c(1+a)}{\pi R(1+a^2)}. \end{cases} \quad (7)$$

Как видно, в системе (1) возникают устойчивые автоколебания с постоянной составляющей и амплитудой, определяемыми (7). В этом случае система (1) описывается уравнениями невозмущенной системы (3).

Запишем уравнение относительно разности токов $y = i_1 - i_2$:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{u}{L_1} + \frac{u}{L_2} = \frac{2\Delta L}{L_1L_2}u = Au, \quad (8)$$

где $A = \frac{2\Delta L}{L_1L_2}$.

Так как произведение L_1L_2 практически постоянно в силу малости ΔL , то величина A пропорциональна ΔL , а значит и измеряемому отклонению.

Построим наблюдатель:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{y}}{dt} = \hat{A}u + M\bar{y}; \\ \frac{d\hat{A}}{dt} = lM\bar{y}u, \end{cases} \quad (9)$$

где \hat{y}, \hat{A} - оценки параметров y, A ; l, M - некоторые положительные коэффициенты.

Уравнения в невязках в предположении $\frac{dA}{dt} \approx 0$ принимают вид

$$\begin{cases} \frac{d\bar{y}}{dt} = \bar{A}u - M\bar{y}; \\ \frac{d\bar{A}}{dt} = -lM\bar{y}u, \end{cases}$$

где $\bar{y} = y - \hat{y}$, $\bar{A} = A - \hat{A}$ - невязки по y и A соответственно.

Нетрудно видеть, что при достаточно большом M , например $M \rightarrow \infty$,

$$M\bar{y} \rightarrow \bar{A}u.$$

Тогда

$$\dot{\bar{A}} = -l\bar{A}u^2,$$

и, следовательно,

$$\bar{A} \rightarrow 0, \hat{A} \rightarrow A.$$

Таким образом, наблюдатель (9) решает задачу восстановления параметра A , а значит и искомого отклонения. Выбором коэффициентов M, l обеспечиваются необходимые темпы сходимости невязок к нулю.

Для оценки динамических и инвариантных свойств предложенного алгоритма проводилось его сравнительное моделирование в сопоставлении с традиционным подходом. В качестве прототипа исследовался алгоритм синхронного детектирования, обычно применяемый в приборах измерения шероховатости контактного типа с дифференциальными чувствительными элементами [4]. И в том, и другом случае на систему воздействуют ненаблюдаемые аддитивные и параметрические возмущения.

Условия эксперимента следующие.

Номинальные значения: $L = 80 \text{ мГн}$, $R = 80 \text{ Ом}$, $C = 3,1662 \text{ нФ}$.

1) Традиционный подход.

Напряжение генератора опорного сигнала изменяется по закону:

$$e_s = (E + e(t)) \sin \omega_0 t,$$

где $e(t) = E_1 \sin \omega_1 t$ - неизмеряемое параметрическое возмущение; $E = 10 \text{ В}$, $E_1 = 2,5 \text{ В}$, $\omega_0 = 62830 \text{ рад/с}$, $\omega_1 = 100 \text{ рад/с}$.

2) Предлагаемая система.

Напряжения u_1, u_2 изменяются по законам:

$$u_1 = c(t) \text{sign} i_2 + \xi_1; u_2 = c(t) \text{sign} i_1 + \xi_2,$$

где $c = K \sin \omega_2 t + U$; $U = 4 \text{ В}$, $K = 1 \text{ В}$, $\omega_2 = 100 \text{ рад/с}$, $\xi_1 = 0,3 \text{ В}$, $\xi_2 = 2 \text{ В}$.

3) Измеряемое отклонение изменяется по закону:

$$\Delta L = \Delta l \sin \omega_3 t,$$

где $\Delta l = 10^{-7} \text{ Гн}$, $\omega_3 = 500 \text{ рад/с}$.

Результаты сравнительного моделирования представлены на рис.3.

Как видно, аддитивные и параметрические возмущения не влияют на предлагаемую систему. При традиционном подходе восстанавливается огибающая сигнала со всеми возмущениями, которые каким-либо образом добавились к полезному сигналу.

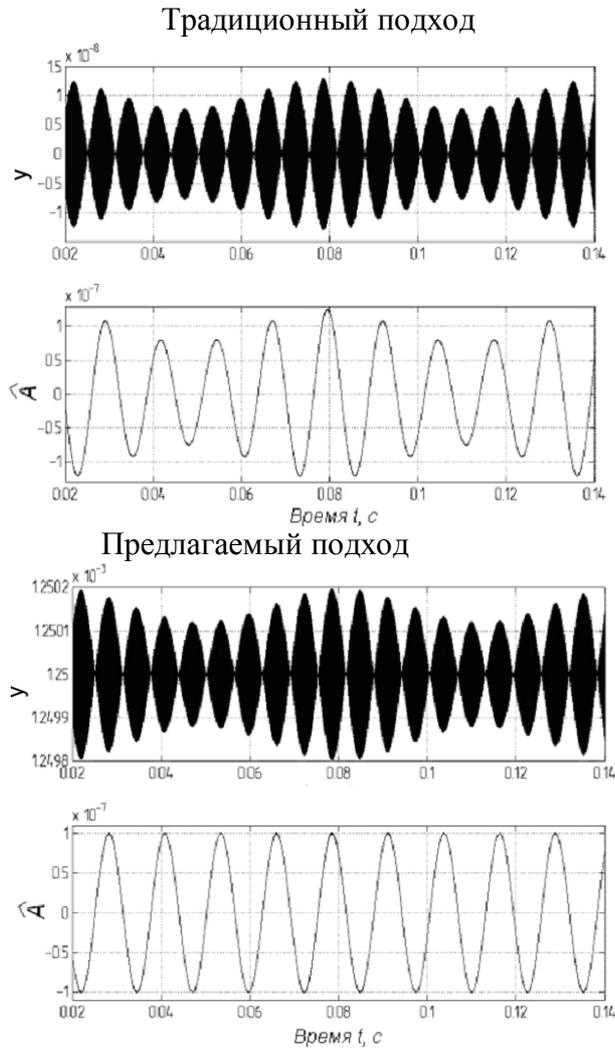


Рис. 3. Результаты сравнительного моделирования

На базе предложенного алгоритма в рамках модернизации промышленного профилографа модели 201 (з-д «Калибр») была реализована и прошла апробацию система управления и идентификации дифференциального электромеханического датчика (рис.4). При относительной простоте исполнения электрической принципиальной схемы, эквивалентной нескольким операционным усилителям, прибор показал следующие характеристики: диапазон измерения – до 2 мм; разрешение – до 5 нм; совокупный коэффициент усиления – 400000; полоса про-

пускания измерительного сигнала – от 0 до 50 Гц.

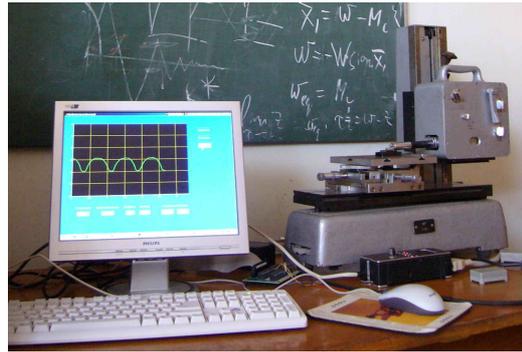


Рис. 4. Пример практической реализации системы управления и идентификации дифференциального электромеханического датчика

Оценка влияния кривизны лопатки

Для иллюстрации основной идеи предлагаемого подхода рассмотрим случай плоскопараллельных сечений. Тогда сферическая поверхность контактного стержня в рассматриваемом сечении представляет окружность того же радиуса, а измеряемая поверхность – некоторую кривую, как показано на рис. 5. Понятно, что при ненулевом угле наклона поверхности лопатки в области контакта точка касания смещается относительно оси стержня.

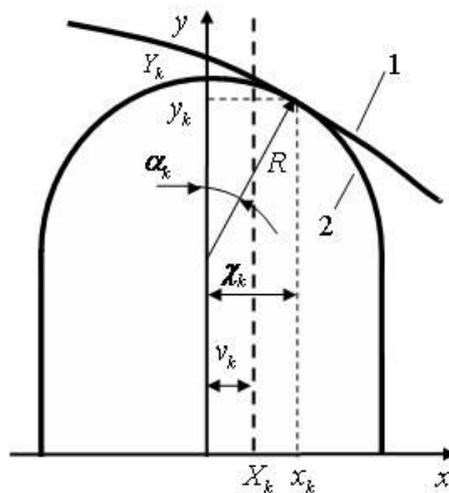


Рис. 5. Смещение точки касания при наклонном положении поверхности лопатки к оси контактного стержня: 1 – поверхность лопатки; 2 – поверхность контактного стержня

При этом очевидно, что сила прижатия контактного стержня, действующая вдоль его оси, приводит к появлению поперечной реакции, проскальзыванию контактного пятна и прогибу контактного стержня. Эпюры действующих сил представлены на рис. 6.

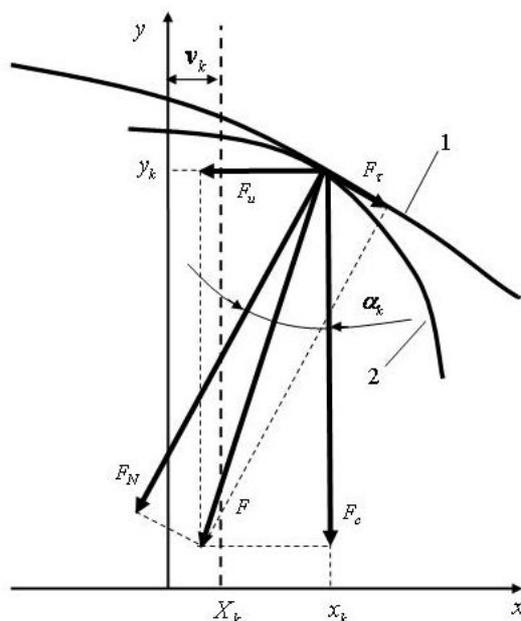


Рис. 6. Эпюры действующих сил в точке касания контактного стержня и пера лопатки: 1 – поверхность лопатки; 2 – поверхность контактного стержня

Пусть искомая поверхность пера лопатки в рассматриваемом сечении описывается соотношением

$$y(x) = \sum_{l=0}^n a_l x^l; \quad l = 0..n, \quad (10)$$

где n - число измерений или число контактных стержней.

Задача состоит в определении неизвестных коэффициентов a_l .

Выпишем основные соотношения, характеризующие состояние равновесия рассматриваемой системы. Для k -го контактного стержня имеем:

- абсцисса точки контакта

$$x_k = \chi_k - v_k + X_k, \quad (11)$$

где χ_k - отклонение точки контакта от оси контактного стержня; v_k - величина прогиба контактного стержня; X_k - абсцисса оси недеформированного контактного стержня (номинальная абсцисса);

- ордината точки контакта

$$y_k = \sum_{l=0}^n a_l x_k^l; \quad (12)$$

- уравнение поверхности контактного стержня в локальных координатах (χ, s)

$$\chi_k^2 + (s_k + R - Y_k)^2 = R^2, \quad (13)$$

где s_k - ордината произвольной точки поверхности k -го контактного стержня; Y_k - ордината вершины недеформированного стержня (номинальная ордината); R - радиус стержня;

- уравнения касательных к искомой поверхности

$$y'_k = \sum_{l=1}^n l a_l x_k^{l-1} \quad (14)$$

и поверхности контактного стержня

$$s'_k (s_k + R - Y_k) = -\chi'_k \chi_k = X_k - v_k - x_k. \quad (15)$$

Соотношения между компонентами действующих сил в точке контакта:

- продольная составляющая силы реакции поверхности лопатки

$$F_c = F_N \cos \alpha_k + F_\tau \sin \alpha_k;$$

- поперечная составляющая силы реакции

$$F_u = F_N \sin \alpha_k - F_\tau \cos \alpha_k.$$

Здесь F_N, F_τ - нормальная и касательная компоненты вектора силы в точке контакта.

По закону Кулона-Амонтона [5] сила сухого трения покоя, определяющая касательную реакцию поверхности в точке контакта, в данном случае принимает вид

$$F_\tau = \mu F_N; \quad \mu = -|\mu| \text{sign}(y'_k),$$

где $|\mu|$ - коэффициент сухого трения покоя.

Прогиб контактного стержня, представляющего собой консольно закрепленную однородную балку, под действием поперечной силы определяется соотношением [5]

$$v_k = \frac{F_u y_k^3}{3EJ},$$

где E - модуль Юнга; $J = \frac{\pi R^4}{4}$ - момент инерции сечения стержня.

В результате несложных вычислений, учитывая

$$\text{tg}(\alpha_k) = y'_k,$$

находим величину поперечной силы

$$F_u = \frac{y'_k - \mu}{1 + \mu y'_k} F_c$$

и затем величину прогиба стержня в точке контакта

$$v_k = \frac{(y'_k - \mu) y_k^3 F_c}{3EJ(1 + \mu y'_k)}. \quad (16)$$

В состоянии равновесия координаты точки контакта определяются следующими соотношениями:

$$\begin{cases} y_k = s_k; \\ y'_k = s'_k; \\ F_c = F_0. \end{cases} \quad (17)$$

В результате подстановки (11)-(16) в (17) получим для k -го стержня:

$$\begin{cases} R^2 = (x_k + v_k - X_k)^2 + \left(\sum_{l=0}^n a_l x_k^l + R - Y_k \right)^2; \\ 0 = (x_k + v_k - X_k) + \left(\sum_{l=0}^n a_l x_k^l + R - Y_k \right) \left(\sum_{l=1}^n l a_l x_k^{l-1} \right); \\ 3EJ \left(1 + \mu \sum_{l=1}^n l a_l x_k^{l-1} \right) v_k = \left(-\mu + \sum_{l=1}^n l a_l x_k^{l-1} \right) \left(\sum_{l=0}^n a_l x_k^l \right)^3 F_0. \end{cases} \quad (18)$$

Коэффициенты a_l , $l = 0 \dots n$, однозначно определяющие искомую поверхность, находятся совместным решением $n+1$ систем вида (18), представляющих в совокупности систему из $3(n+1)$, вообще говоря, нелинейных уравнений. В то же время, хотя в каждом сечении мы имеем $n+1$ измерений, в каждой точке контакта в силу (18) определены три величины: значение искомой функции, ее производной и второй производной. Таким образом, задача фактически становится эквивалентной отысканию поверхности в виде (10) при $3(n+1)$ измерениях.

Рассмотрим в качестве примера задачу оценки участков поверхности, представленных в одном и том же сечении кривыми:

а) $y(x) = 69 - 0,4x - 0,04x^2$ - на одном конце, со средней длиной консоли контактного стержня $Y_{cp} = 65 \text{ мм}$;

б) $y(x) = 19 - 0,4x - 0,04x^2$ - на другом конце, со средней длиной консоли контактного стержня $Y_{cp} = 15 \text{ мм}$.

И в том, и в другом случае $x \in [0; 10 \text{ мм}]$, $E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; $F_0 = 1 \text{ Н}$; $R = 1 \text{ мм}$; $\mu = 0,15$.

На рис. 7 представлены результаты вычислений и сопоставления точных решений с кривыми, полученными без учета влияния кривизны поверхности для обоих случаев.

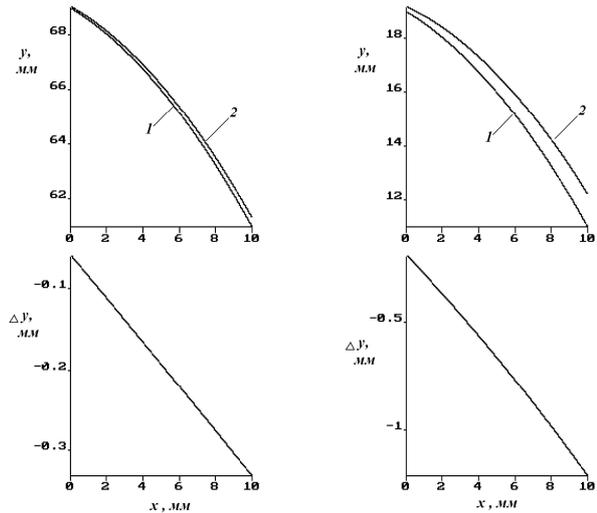


Рис. 7. Результаты расчета кривых для двух участков поверхности лопатки:

1 – точная кривая сечения поверхности лопатки;
2 – измеренные значения без учета влияния кривизны
 $Y_{cp} = 65 \text{ мм}$ (а), 15 мм (б)

Как видно, погрешность измерения и оценки искомой поверхности без учета влияния кривизны даже в этих простейших случаях достигает 10% и более.

Особенности вычислительного программного обеспечения и обработки информации

При достаточно большом n решение системы (18), особенно в условиях ограничения времени расчета, может доставлять определенные трудности. Например, для обеспечения желаемого быстродействия – порядка 20-30 шт./мин при 30 измерительных сечениях на длине лопатки, что составляет в совокупности около 1200 точек – время расчета $y(x)$ не должно превышать 20-30 мс.

Один из вариантов решения этой задачи состоит в использовании вычислительной среды Matlab/Simulink. Существенной особенностью предлагаемого окружения, наряду с мощными вычислительными и графическими возможностями, является способность интегрировать измерительные сигналы в вычислительную среду с помощью программно-аппаратных средств реального времени. Пример реализации измерительной управляющей системы представлен на рис.8.

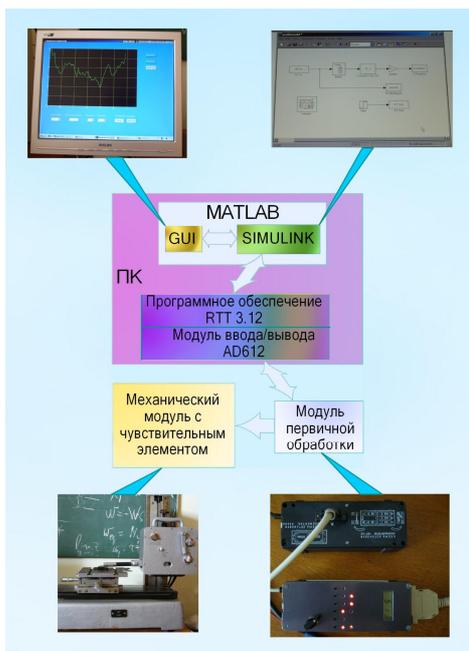


Рис. 8. Пример реализации измерительной управляющей системы реального времени в среде Matlab/Simulink

Сигналы с выхода модуля первичной обработки, представляющего аппаратную реализацию алгоритма управления и идентификации, описанного в первом разделе, поступают в ПК для дальнейшей обработки, например коррекции влияния кривизны, графического представления и т.д. В предложенной системе применяется ПО реального времени RTT 3.12 (Real Time Toolbox), являющееся приложением Matlab/Simulink, в сочетании с модулем ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов AD612, также поддерживаемым Matlab/Simulink – и то, и другое производства фирмы Humusoft, Чешская республика.

Аппаратная вычислительная поддержка в реальном времени обеспечивается применением цифрового сигнального контроллера TMS320F2812 или аналогичного ему по классу. По своим характеристикам и производительности: разрядность – 32; тактовая частота – 150 МГц; 16 аналого-цифровых и 6 цифро-аналоговых преобразователей; развитая периферия; поддержка Matlab/Simulink, библиотеки с плавающей точкой – этот контроллер сопоставим с ПК типа Pentium-I. Внешний вид контроллера в составе модуля связи с ПК и интерфейсной платы для согласования уровней входных и выходных сигналов, сохранения информации на внешних носителях показан на рис. 9.



Рис. 9. Система обработки информации в реальном времени на основе цифрового сигнального контроллера TMS320F2812

Заключение

В представленной работе сделана попытка даже не решения, а скорее осмысления основных подходов к решению одной из актуальных задач современного авиационного двигателестроения – построения автоматизированной системы измерения геометрии лопаток турбин в производственно-цеховых условиях.

Отправной точкой проводимого исследования послужило очевидное и естественное требование технологической преемственности внедряемого оборудования. В работе обосновывается наилучшая в контексте основной задачи конфигурация автоматизированной системы – модернизация ПОМКЛ путём замены оптико-механической системы контроля быстродействующей измерительной системы с дифференциальными датчиками, интегрированной в вычислительную среду реального времени. По существу, доказывается простая мысль: не надо ничего выдумывать, всё уже есть – есть ПОМКЛ с проверенной несущей и исполнительной механикой, есть эффективные алгоритмы управления и идентификации дифференциального датчика, составляющие основу быстродействующей многоканальной измерительной системы, есть эффективные алгоритмы коррекции влияния кривизны и аналитического описания пера лопатки, есть программно-аппаратная поддержка вычислений и графической обработки в реальном времени. В этом случае ожидаемый показатель «производительность/цена», выраженный в единицах «шт. в час/1000\$», может достигать значений 150-500 при несопоставимости

вимой с оптическими системами надежности и неприхотливости оборудования. Кроме того, система обеспечивает автоматическую калибровку и не требует предварительной настройки.

В то же время многие важные вопросы остались за рамками данной работы. В частности, не исследованы задачи оптимальной аналитической аппроксимации поверхности, выбора системы опорных функций, оптимизации процедур численного расчета. Можно показать, например, что при использовании тригонометрических полиномов решение может быть найдено в явном виде и при сохранении заданного быстродействия аппроксимация поверхности может быть выполнена на массиве из $n \sim 10^6$ точек и более. Следует учитывать, вообще говоря, и деформацию контактных стержней, которая по предварительной оценке может составлять 2-4 мкм.

В этой связи возникает вопрос: а насколько и зачем нужно аналитическое представление поверхности? Ответ достаточно очевиден – это наиболее точное и компактное математическое описание измеряемой поверхности, позволяющее сохранять и архивировать информацию по каждой лопатке, формировать большие массивы такого рода данных, осуществлять текущий мониторинг и анализ погрешностей в реальном времени, характер их накопления и историю возникновения, идентифицировать параметры технологического процесса и т.д. Что самое важное – аналитическое описание, представляя математическую модель лопатки, дает исчерпывающую возможность для применения всего арсенала средств математического анализа. По сути, в данном случае речь идет о так называемом реверсивном инжиниринге в реальном времени.

В работе практически не рассматривалась активная точка зрения на чувствительный элемент, когда датчик совмещает функции сенсора и актюатора. Например, в данной конфигурации дифференциальный индуктивный датчик может быть источником механических усилий, выступая в роли электромагнита. В самом деле, в этом случае появляется возможность регулирования усилий в контакте с измеряемой поверхностью. Как следствие, радиус контактного стержня

и усилия в контакте могут быть снижены, практически, до нуля, что, естественно, ведет к повышению точности прямых измерений и быстродействия системы в целом. Если при этом обеспечить возможность перемещения пера лопатки во взаимно-перпендикулярных направлениях в пределах шага сетки, например за счет оснащения крепежного узла электромагнитным приводом, то можно, в принципе, при сохранении производительности не только повысить точность аппроксимации, но и проводить измерения шероховатости в каждой точке поверхности лопатки. Более того, упрочнение наконечника контактного стержня и его изготовление в виде иглы, подобной шупу профилометра, предоставляет и вовсе уникальную возможность одновременной оценки шероховатости и микротвердости покрытия в каждой точке измеряемого микропрофиля и поверхности лопатки в целом.

Библиографический список

1. Кеткович, А.А. Лазерная компьютерная система контроля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 [Текст] / А.А. Кеткович, Н.И. Яковлева, Б.А. Чичигин // Контроль. Диагностика. - 2007. - № 3. – С. 32-34.
2. Исследование погрешностей базирования в механизме крепления лопатки наладки ПОМКЛ-БЛИК в системе аппроксимативного анализа двумерных плотностей вероятностей [Текст] / М.А. Болотов, А.Н. Жидяев, И.А. Лёзин [и др.] // Вестн. СГАУ.- 2009. №3(19). – С. 322-327.
3. Kiselyov, S.A. The control and identification algorithm for devices with differential inductive sensors / S.A. Kiselyov, S.A. Kochetkov, P.A. Shavrin // Proceedings of 17 world IFAC congress. South Korea, Seoul. 6-11 July 2008. P. 1809-1814.
4. Morrison, E. The development of a prototype high-speed stylus profilometer and its application to rapid 3D surface measurement / E. Morrison // Nanotechnology. 1996. No 1. P. 37-42.
5. Александров, А.В. Соппротивление материалов: учеб. для вузов [Текст] / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин; под ред. А.В. Александрова. – М.: Высш. шк., 2004. – 560 с.

AUTOMATED SYSTEM FOR MEASURING GEOMETRIC PARAMETERS OF TURBINE BLADES IN PRODUCTION CONDITIONS

© 2011 E. I. Aleksentsev¹, P. A. Shavrin², O. B. Fedoseev²

¹Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

²Togliatti State University

The problem of developing the automated system for measuring the geometry of blades for gas turbine engines (GTE) in production conditions is considered. The starting point of the study was the technological continuity requirement being implemented equipment. In the theoretical analysis, supported by the results of simulation and experimental studies the best configuration of automated systems is justified in the context of the main problem - upgrading the POMKL by replacing the optical-mechanical system with high-speed measurement system with differential sensors, integrated into real-time computing environment. The paper presents efficient control and identification algorithms for differential sensors that form the basis of multi-channel high-speed measuring system, the curvature correction algorithms and analytical description of the blades, description of hardware and software to support computing in real time. In this case the expected rate "performance/price" may reach 150-500 units per hour/1000 \$ for non-comparable with optical systems, reliability and simplicity of equipment.

Turbine blades, geometric parameters, production conditions, automated measuring system, technological continuity, modernization of POMKL, differential sensors, high-speed control and identification system, correction of the blade curvature, analytical description of the surface, real time, hardware and software support.

Информация об авторах

Алексенцев Евгений Иванович, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: двигателестроение, технологии и материалы в машиностроительном производстве.

Шаврин Павел Аркадьевич, кандидат технических наук, начальник НИЛ «Мехатроника и автоматика» Тольяттинского государственного университета. Тел.: (8482) 546471. E-mail: pshavrin@yandex.ru. Область научных интересов: прикладные задачи управления.

Федосеев Олег Борисович, доктор технических наук, профессор Тольяттинского государственного университета. Область научных интересов: термодинамика неустановившихся процессов.

Aleksentsev Evgenii Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, main scientific researcher, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: design and manufacturing of engines, technologies and materials in machine manufacturing.

Shavrin Pavel Arkad'yevich, Candidate of Technical Sciences, head of laboratory "Mechatronics and Automatics" of Togliatti State University. Tel.: (8482) 546471. E-mail: pshavrin@yandex.ru. Area of research: applied control problems.

Fedoseev Oleg Borisovich, doctor of technical sciences, professor of Togliatti State University. Area of research: thermodynamics of nonstationary processes.