

УДК: 519.6 + 681.327

В.П. Зинченко¹, С.В. Зинченко², М.В. Добролюбова¹¹ *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*² *Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины, Киев*

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Изложены проблемы одновременного измерения давления в распределенных отверстиях на моделях летательных аппаратов и в струях двигателей, а именно: постановка задачи, многоканальные средства, информационные и измерительные системы, методы обработки данных, функции преобразования, алгоритмы.

Ключевые слова: алгоритм, эксперимент, исследования, информация, измерение, системы, методы.

Введение

Значительная часть экспериментальных исследований (ЭИ) в аэродинамических трубах (АДТ) направлена на одновременное измерение давления воздуха в распределенных проемах в АДТ на моделях летательных аппаратов (МЛА) и в струях двигателей, так называемые дренажные испытания [1].

Например, МЛА Ан-124 (122МС.400.001) имела 1136 дренажных отверстий и пневмотрасс (ПТ) – медные $2 \times 0,05$ и поливинилхлоридные трубки $3 \times 0,075$. Одновременное измерение давления на МЛА обеспечивают электромеханические пневмокоммутаторы (ЭМПК) (рис. 1, а), а в струях имитаторов двигателей/двигателей – ЭМПК и пневмомодули (рис. 1, б)) [2, 3].

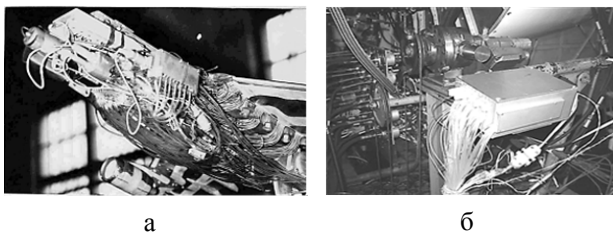


Рис. 1. Электромеханические пневмокоммутаторы и пневмомодули

Постановка задачи

В основу ЭИ МЛА в АДТ положен такой алгоритм:

$$N_i \rightarrow M_i \rightarrow P_i \rightarrow L_i \rightarrow \{D_i\} \rightarrow I_i \rightarrow R_i \rightarrow \quad (1)$$

$$\quad \quad \quad \uparrow \leftarrow M_{i+1} \leftarrow N_{i+1} \quad \leftarrow \downarrow$$

где N_i – гипотеза/ожидаемый результат; M_i – вариант МЛА; P_i – программа ЭИ; L_i – алгоритм обработки и анализа ЭД; D_i – получение ЭД; I_i – интерпретация результатов; R_i – критерий достижения цели.

Актуальной проблемой для этапов L_i и D_i (1) является создание средств и методов одновременного измерения давления, что и рассматривается дальше в статье.

Многоканальные средства

Отверстия отбора давления с помощью ПТ соединяются с датчиками давления (ДД), которые подключаются к каналам измерительной системы (ИС). Такая схема имеет следующие недостатки: большое количество ДД; наводки и шумы в сигналах от ДД до ИС порождают недопустимые погрешности измерения. Проблемы решаются путем применения прецизионных измерительных приборов с программируемым фильтром, интерфейсом связи с компьютером и временем измерения по каналу не больше 40 мс. Например, 34970А/мультиметр, 34902А/мультиплексор Agilent Technologies. Стоимость такой ИС высокая, даже для 16 каналов цикл измерения не меньше 640 мс, что для большинства ЭИ неприемлемо.

Другой способ – это применение ЭМПК. Например, ЭМПК (рис. 2) позволяет последовательно подключать к ДД 12 ПТ из которых две (вакуум, атмосфера) необходимы для определения текущей функции преобразования ДД и повышения точности измерения. Недостатки такие: длинные 10-15 м ПТ с временем установления давления не меньше 300 мс; цикл измерения по каналу не меньше 4 с (медленные процессы); управление электромагнитными клапанами коммутации ПТ выполняется с помощью мощных сигналов (24 В, 3 А), которые нагревают ДТ и изменяют его функцию преобразования (разброс $\approx 20\%$), что порождает существенные погрешности измерения; крайне низкая надежность электромагнитных клапанов. Серия ЭМПК типа ПК-180/300/420 [2, 3] (рис. 2, б)) имеет такие особенности: непрерывное вращение ротора коммутирующего узла; коммутирующий узел с фазовым сдвигом

підключає ПТ к 4 (ПК-180) или 7 (ПК-300/420) ДД; синхронно с підключенням ПТ до ДД и с учетом времени установления давления выполняются измерения; выходные сигналы с ДД ДМИ-01/03/0,6 усиливаются до уровня +5 В, уровень выходных сигналов ДД ИКД +9,5 В; возможно последовательно/параллельно запускать ЭМПК; подается статический, контрольный -500 ± 1 кг/м² и давление с МЛА.



Рис. 2. Измерение давления на МЛА с помощью ЭМПК

Блок ДД типа ИКД (не больше 20) комплектуются на необходимые номиналы давления от 0,016 до 6 кг/см². Количество отверстий измерения не больше 1170. ДД ИКД-0,04 применяется для определения перепада между статическим в форкамере и атмосферным давлением в рабочей части АДТ с погрешностью не больше 0,6 кг/м². Диапазон измерения перепадов давления: на МГЛА от -1800 до +200 кг/м² с погрешностью не больше 3 кг/м²; в струях имитаторов двигателей от -200 до +5000 кг/м² с погрешностью не больше 10 кг/м².

Так как при измерении давления в рабочей части АДТ необходимо выполнить два противоречивые требования: минимизации длины ПТ и расстояния от ДД до ИС, то в таких условиях целесообразно применять мобильные многоканальные измерители давления (ММИД) с интерфейсом для передачи в реальном времени ЭД в ИС, которые могут устанавливаться в АДТ внутри/снаружи МЛА. Например, МИД-10 (рис. 3, а) и его модификация МИД-10-1 (рис. 3, б)).



Рис. 3. Многоканальные измерители давления

МИД-10/10-1 имеет герметичный корпус с 10 штуцерами для подключения ПТ, блоки ДД, контроллер и 2 разъема для подключения питания, линий связи и их транзита. Интерфейс RS-485 с гальванической развязкой для защиты от наводок в соединительных линиях позволяет реализовывать распределенные ИС [3].

МИД-10 обеспечивает цикл измерения не больше 100 мс, время передачи данных не больше 30 мс

и погрешность не больше 0,15 %. В МИД-10-1 модули ДД – это отдельные мезоны с ДД типа ТДМ-А и усилителем – нормализатором сигнала, что позволяет модифицировать устройство путем установки разных ДД и их калибровки через RS-485. Время измерения и передачи данных ≤ 30 мс. Допускается последовательное соединение до 32 устройств, что увеличивает число каналов до 320.

В качестве ММИД применяются пневмомодули (рис. 4), которых может быть до 16 с количеством измеряемых каналов 256 и более.



Рис. 4. Пневмомодуль

Пневмомодуль имеет 16 дифференциальных пьезоэлектрических ДД со встроенными усилителями сигналов, стабилизатором напряжения и электронным коммутатором. Калибровки ДД выполняется за короткое время, где для каждого ДД определяется функция преобразования и оценивается точность. Время измерения рассчитывается для конкретных ПТ и МЛА.

Информационно-измерительная система

Унифицированная схема ИИС многоканального измерения давления показана на рис. 5 [3], где: К – компьютер; Км – компьютерная сеть; ДС – датчики синхроимпульсов; МК – модуль управления; V_∞ – скорость потока; α – угол атаки МЛА; ω – скорость ротора ЭМПК; $P_c, P_u, P_s, P_e, P_i, P_0$ – давление статическое, динамическое, опорное, эталонное в i-м дренажном отверстии и в форкамере соответственно; u_i – выходной сигнал ДД.

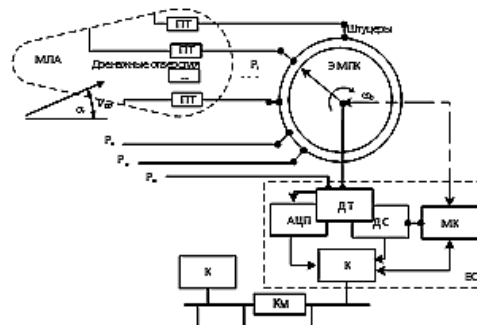


Рис. 5. Унифицированная схема ИИС многоканального измерения давления

Реализовать ИИС можно на разных аппаратных и программных платформах (VME, PC/104, MicroPC, др.). ИИС обеспечивает выполнение алгоритма [3, 4].

Измерительная система

В ИС последовательного типа давление P_i через ПТ подается на ДД, выходы которого подключены к входу АЦП, а затем поступает на регистры ПК, где выполняется регистрация, обработка и анализ ЭД. Алгоритм работы ИС для одного опыта приведен в [3]. При выполнении ЭИ по схеме «точка на точку» применяется ИС параллельного действия, где обработка и независимое управление каждым каналом выполняется одновременно. Взаимодействие ЭМПК с ИС имеет свой алгоритм [2].

В распределенной ИС для обмена данными между процессорным модулем и ДД используются встроенные в контроллеры RS-485 (рис. 6), что уменьшает количество однотипных блоков [3, 4].

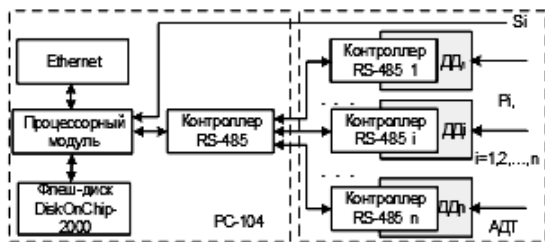


Рис. 6. Обмен данными в распределенной ИС

Первичная обработка

Вычисляется, сортируется и сохраняется значение абсолютного и относительного давления [3].

Пусть u_{ij} – массив ЭД ($n \times m$) ($u_{1j} \sim P_{sj}$, $u_{2j} \sim P_{ej}$, $u_{3j} \sim P_{ej}$, $j=1, 2, \dots, m-1$, $u_{im} \sim q_i$, $i=1, 2, \dots, n$, $u_{ij} \sim P_{ij}$, $i=4, 5, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m-1$), где i – цикл ЭМПК ($i=1, 2, \dots, n$), j – номер штуцера ЭМПК ($j=1, 2, \dots, m$), тогда значения давлений определяется функционалом Z (процедура):

$$P_{sj} = Z_s \left[\sum_{k=0}^{\xi_s} a_k^s u_{1j}^k \right];$$

$$P_{ej} = Z_e \left[\sum_{k=0}^{\xi_e} a_k^e \left(\frac{u_{2j} + u_{3j}}{2} \right)^k \right];$$

$$P_{ij} = \begin{cases} Z_d \left[\sum_{k=0}^{\xi_d} a_k^d (u_{ij} - u_{1j})^k \right] - \text{нелинейные;} \\ \left(P_e / P_{ej} \right) \cdot (u_{ij} - u_{1j}) - \text{линейные,} \end{cases} \quad (2)$$

где $a_k^{<w>}$, $w = \{s, e, d, q\}$, $\{\xi_k\}_{k \in w}$ – коэффициенты функции преобразования ДД и их количество.

Скоростной напор в рабочей части АДТ постоянно пульсирует, и поэтому его величина и относительное значение давления определяются так:

$$q_i = Z_q \left[\sum_{k=0}^{\xi_q} a_k^q (u_{im} - u_{1m})^k \right], \quad \bar{P}_{ij} = Z_0 \left[\frac{P_{ij}}{\mu q_i} \right],$$

где μ – коэффициенты поля АДТ.

Если $R_{\eta\lambda}$ – матрица размещения дренажных отверстий на МЛА и подключения ПТ к ЭМПК, то $\bar{P}_{\eta\lambda} = Z_g [R_{\eta\lambda}]$, где $\eta=1, 2, \dots$ – номера сечений; λ – порядок дренажных отверстий ($\eta \times \lambda \leq m \times n$).

Если r – число повторов опыта, то среднее значение относительного давления и его ско определяются так:

$$\hat{\bar{P}}_{\eta\lambda} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \bar{P}_{\eta\lambda}^{<k>}; \quad \sigma_{\eta\lambda} = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{k=1}^r \left(\hat{\bar{P}}_{\eta\lambda}^{<k>} - \bar{P}_{\eta\lambda}^{<k>} \right)^2}. \quad (3)$$

Гипотеза о нормальном законе распределения ЭД подтверждена критерием Пирсона $\chi = 7,13$, что допустимо при уровне значимости $\gamma = 0,95$.

Оценка значений относительного давления с надежностью γ (доверительный интервал) такая:

$$\hat{\bar{P}}_{\eta\lambda} - t_\gamma \frac{\sigma_{\eta\lambda}}{\sqrt{r}}, \quad \hat{\bar{P}}_{\eta\lambda} + t_\gamma \frac{\sigma_{\eta\lambda}}{\sqrt{r}},$$

где $t_\gamma(\gamma, r)$ – табличное значение.

По данным повторных опытов подтверждается статистическая воспроизводимость ЭД по критерию Кохрена:

$$G = \sigma_{\max}^2 / \sum_{i=1}^N \sigma_i^2,$$

где $\sigma_{\max}^2 = \max \{ \sigma_i^2 \}_{i=1}^N$; σ_i^2 – дисперсии i -го опыта (3); N – количество опытов. Если $G \leq G_t$ для $\nu_1 = m-1$, $\nu_2 = N$, $\alpha = 0,05$, то ЭД однородные и ошибка ЭД оценивается так:

$$\delta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2.$$

Число Рейнольдса

$$Re = \sqrt{2gl / (3v)},$$

где $v = \frac{P}{\rho_{15}} (1,745 + 0,005t) 10^{-6}$; $P = \frac{0,0474 P_a}{273,15 + t}$; t –

температура в АДТ; ρ_{15} – плотность при $t = 15^\circ C$; P_a – барометрическое давление; l – размер МЛА.

Достоверность ЭД обеспечивает алгоритм оперативного контроля ИИС [1, 3]. Регистрируются u_{ij} при корректной работе ИС, иначе опыт повторяется.

Функции преобразования ДД

Обеспечивается заданная точность измерения давления (2) за счет представления функции преобразования ДД в виде полинома [5, 6]:

$$\hat{Y} = \sum_{i=0}^m a_i x^i, \quad (4)$$

где \hat{Y} – вектор приближенных значений давления; m – порядок полинома.

Коэффициенты (4) определяются из условия:

$$\min Q_p = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2,$$

где Y , \hat{Y} – вектор измеренного и заданного давления; n – количество опытов. Так как $x_i \in X, y_i \in Y$, то порядки независимой задаются так $x_{ij} = x_i^j$, где $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$. Поиск заканчивается при $Q_p \leq Q_{p+1}$, где $p \leq m - 1$. Значимость коэффициентов оценивается по t – статистике Стьюдента: если $t_i > t_{0.05, n-m-2}$, то a_i – значимый.

Уравнение (4) значимо, если выполняется условие $F > F_{0.05, n-2, 1}$. В противном случае – у n изменить порядок (4) или проверить ЭД.

В случае влияния на характеристики ДД температуры, влажности и т.п. необходимо использовать D – оптимальные планы эксперимента.

Суммарные характеристики

Определяются коэффициенты нормальной c_{Np} и продольной c_{Rp} составляющих аэродинамической силы, коэффициент продольного момента m_{Zp} , относительного положения центра давления x_d :

$$c_{Np} = \oint \bar{P}(\bar{x}) d\bar{x}; \quad c_{Rp} = \oint \bar{P}(\bar{y}) d\bar{y};$$

$$m_{Zp} = \frac{1}{2} \oint \bar{P}(\bar{x}) d\bar{x} - \frac{1}{2} \oint \bar{P}(\bar{y}) d\bar{y}; \quad \bar{x}_d = -\frac{m_{Zp}}{c_{Np}}. \quad (5)$$

В связанной системе координат определяются: $c_{Yp} = c_{Np} \cos \alpha - c_{Rp} \sin \alpha$; $c_{Xp} = c_{Np} \sin \alpha - c_{Rp} \cos \alpha$.

Нормальная N и тангенциальная T составляющие аэродинамической силы определяются так: $N = c_n S q_\infty$; $T = c_\tau S q_\infty$, где S – характерная площадь МЛА; q_∞ – скоростной напор в АДТ.

Проблемой (5) является вычисление интеграла табличной функции с минимальной погрешностью. Для этого применяются методы численного интегрирования, где $f(x)$ заменяется приближенной функцией:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^b P_{n-1}(x) dx + \int_a^b R_{n-1}(x) dx.$$

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ У АЕРОДИНАМІЧНОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ

В.П. Зінченко, С.В. Зінченко, М.В. Добролюбова

Розглянуто проблеми одночасного вимірювання тиску в розподілених отворах на моделях літальних апаратів і в струменях двигунів, а саме: постановка задачі, багатоканальні засоби, інформаційні та вимірювальні системи, методи обробки даних, функції перетворення, алгоритми.

Ключові слова: алгоритм, експеримент, дослідження, інформація, вимірювання, системи, методи.

THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF PRESSURE MEASUREMENT IN WIND TUNNEL EXPERIMENT

V.P. Zinchenko, S.V. Zinchenko, M.V. Dobroliubova

The problems of the simultaneous pressure measurement in distributed holes on models of aircraft and jet engines, namely are presented.

Keywords: algorithm, experiment, investigation, information, measurement, systems, methods.

Методы тестировались на

$$f(x) = \frac{1}{1+x^2}$$

и было показано, что целесообразно для рассмотренных задач использовать метод Ромберга [3].

Выводы

Рассмотрены многоканальные измерители давления в АДТ, которые могут применяться как автономно, так и в составе автоматизированных систем.

Изложены проблемы ЭИ одновременного измерения давления в распределенных отверстиях на МЛА и в струях двигателей.

Показано, что при проектировании ИИС необходимо учитывать специфику средств многоканальных измерений давления. Предложены наиболее эффективные схемы построения распределенных ИИС с использованием стандартов: MicroPC, PC-104.

Список литературы

1. Зінченко В.П. Інформаційна технологія проектних досліджень складних технічних об'єктів / В.П. Зінченко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2000. – № 4. – С. 32 – 42.
2. Разработка и исследование внутримодельных пневмокоммутаторов для многоточечного измерения давления в АДТ / Н.В. Руденко, В.К. Артамонов, В.П. Зінченко и др. // Труды ЦИАМ. Вып. 2.– М., 1981. – С. 78 – 97.
3. Зінченко В.П. Багатоканальні системи автоматизованого вимірювання тиску в аеродинамічному експерименті / В.П. Зінченко, С.В. Зінченко, Лі Вей // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2015. – Вип. 12. – С. 12 – 18.
4. Зінченко В.П. Алгоритмы и базовые программные модули для управления технологическими модулями Prometheus / В.П. Зінченко, С.В. Зінченко // УСМ. – 2007. – № 5. – С. 52 – 60.
5. Зінченко В.П. Методологія проектування первинних джерел інформації / В.П. Зінченко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2001. – № 5. – С. 69 – 72.
6. Зінченко С.В. Моделювання первинних джерел інформації в STATISTICA / С.В. Зінченко, В.П. Зінченко, М.В. Добролюбова // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 6(131). – С. 68 – 74.

Поступила в редколлегию 28.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.И. Алишев, Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины, Киев.