

УДК: 519.6 + 681.327

В.П. Зинченко<sup>1</sup>, С.В. Зинченко<sup>2</sup>, М.В. Добролюбова<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*<sup>2</sup> *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 поливинхлоридные 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].

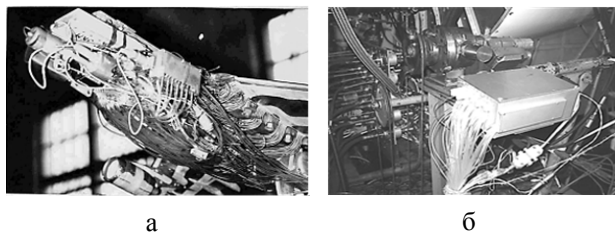


Рис. 1. Электромеханические пневмокоммутаторы и пневмомодули

### Постановка задачи

В основу ЭИ МЛА в АДТ положен такой алгоритм:

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

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

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

подключает ПТ к 4 (ПК-180) или 7 (ПК-300/420) ДД; синхронно с подключением 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/м<sup>2</sup> и давление с МЛА.

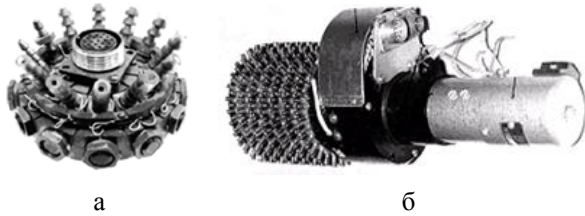


Рис. 2. Измерение давления на МЛА с помощью ЭМПК

Блок ДД типа ИКД (не больше 20) комплектуются на необходимые номиналы давления от 0,016 до 6 кг/см<sup>2</sup>. 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/м<sup>2</sup>. Диапазон измерения перепадов давления: на МГЛА от -1800 до +200 кг/м<sup>2</sup> с погрешностью не больше 3 кг/м<sup>2</sup>; в струях имитаторов двигателей от -200 до +5000 кг/м<sup>2</sup> с погрешностью не больше 10 кг/м<sup>2</sup>.

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<sub>∞</sub> – скорость потока; α – угол атаки МЛА; ω – скорость ротора ЭМПК; P<sub>c</sub>, P<sub>u</sub>, P<sub>s</sub>, P<sub>e</sub>, P<sub>i</sub>, P<sub>0</sub> – давление статическое, динамическое, опорное, эталонное в i-м дренажном отверстии и в форкамере соответственно; u<sub>i</sub> – выходной сигнал ДД.

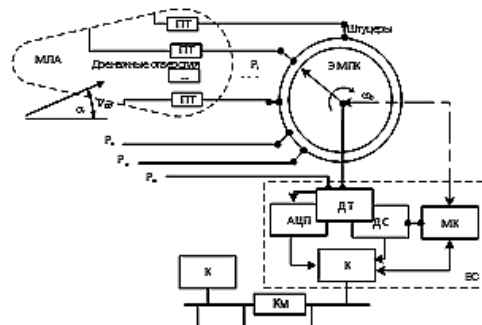


Рис. 5. Унифицированная схема ИИС многоканального измерения давления

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].

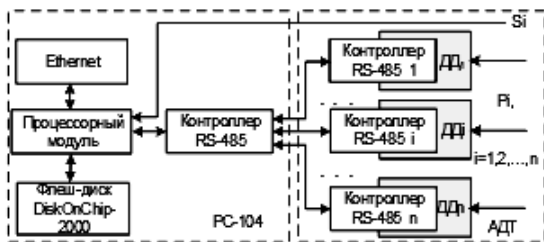


Рис. 6. Обмен данными в распределенной ИС

### 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):

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

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

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

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  $\mu$  – 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;  $\lambda$  – 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  $\gamma$  (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  $\sigma_{\max}^2 = \max \{ \sigma_i^2 \}_{i=1}^N$ ;  $\sigma_i^2$  – 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;  $\rho_{15}$  – 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;  $q_\infty$  – 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.