КОМПЬЮТЕРНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК: 519.6 + 681.327

С.В. ЗІНЧЕНКО, В.П. ЗІНЧЕНКО,
Н.Й. БРОВАРСЬКА, А.Ф. ПОТАПЕНКО

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ПРОЦЕСУ ОРГАНІЗАЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТУ В АЕРОДИНАМІЧНІЙ ТРУБІ

Запропоновано модель уніфікованої інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечує аналіз варіантів комплексування апаратно-програмного середовища для організації процесу одночасного багатоканального вимірювання тиску в експерименті на моделях літальних апаратів в аеродинамічній трубі.

Вступ. Значна частина експериментальних досліджень (ЕД) в аеродинамічних трубах (АДТ) спрямована на одночасне вимірюванням тиску повітря в розподілених отворах в АДТ, на моделях літальних апаратів (МЛА) і в струменях двигунів, так звані дренажні випробування [1].

В основу процесу організації ЕД МЛА в АДТ покладено сценарну модель, яка забезпечує проведення аналізу всіх етапів життєвого циклу (ЖЦ) експерименту [1, 2]:

$$\begin{array}{l} H_i \to M_i \to P_i \to L_i \to \{ D_i \} \to I_i \to R_i \to \\ \qquad\quad \uparrow \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \downarrow \\ \qquad\qquad \leftarrow \; M_{i+1} \; \leftarrow \; H_{i+1} \; \leftarrow \end{array} \qquad (1)$$

де H_i – гіпотеза/очікуваний результат; M_i – варіант МЛА; P_i – програма ЕД; L_i – алгоритм обробки та аналізу даних експерименту (ДЕ); D_i – отримання ДЕ; I_i – інтерпретація результатів; R_i – критерій досягнення цілі.

В роботі розглядаються питання моделювання етапів L_i та D_i (1), реалізація яких забезпечує аналіз та вибір варіанту апаратно-програмного середовища для підтримки одночасного вимірювання тиску в експерименті на МЛА за рахунок використання електромеханічних пневмокомутаторів (ЕМПК) та в струменях імітаторів двигунів [3].

Отвори відбору тиску за допомогою пневмотраси (ПТ) з'єднуються з датчиками тиску

(ДТ), які підключаються до каналів вимірювальної системи (ВС). Така схема має наступні недоліки: велика кількість ДТ; наводки і шуми в сигналах від ДТ до ВС породжують недопустимі похибки вимірювання. Проблеми вирішуються шляхом застосування прецизійних вимірювальних приладів з програмованим фільтром, інтерфейсом зв'язку з комп'ютером та часом вимірювання по каналу ≤ 40 мс.

В роботі [3] приведено аналіз варіантів використання різноманітних серій ЕМПК (типу ПК-180/ 300/ 420), блоці ДТ ИКД (≤ 20), ДТ ИКД-0,04 мобільні багатоканальні вимірювачі тиску (МБВТ) МЗС-10 /10-1 та т. п. Зазначимо, що для розробників засобів вимірювання тиску компанія Freescale надає докладну інформацію.

Для проведення аналізу етапів L_i та D_i (1), пропонується модель уніфікованої інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), яка забезпечує аналіз варіантів багатоканального вимірювання тиску з застосуванням ЕМПК та вимірювальної системи (ВС) [1, 2]. До складу структури ІВС входять: К – комп'ютер; Км – комп'ютерна мережа; ДС – датчики синхроімпульсів, МК – модуль керування, V_∞ – швидкість потоку, α – кут атаки МЛА, ω – швидкість ротора ЕМПК; $P_c, P_u, P_s, P_e, P_i, P_0$ – статичний, динамічний, опорний, еталонний, тиск в *i*-му дренажному отворі та тиск у форкамері відповідно; u_i – вихідні сигнали ДТ.

ВС може бути послідовного та паралельного типу. Тиск P_i через ПТ подається на ДТ, виходи якого за допомогою вимірювального каналу (ВК) підключається до входу аналого-цифрового перетворювача (АЦП), а потім надходить на регістри комп'ютера *K*, де відбувається її реєстрація, обробка та аналіз [1].

Структура ІВС є універсальною, яку можна реалізувати на різних апаратних і програмних платформах (VME, PC/104, MicroPC, ін.). ІВС забезпечує виконання наступного алгоритму [1].

Крок 1. Перевірка ВС та введення початкових даних.

Крок 2. Розв'язок задачі адаптивного керування ЕД (визначення параметрів керування) [2].

Крок 3. Керування ЕД у відповідності до умов досліду в плані експерименту (ПЕ). Якщо ПЕ виконаний, то перехід на крок 7.

Крок 4. Установка заданих в ПЕ кутів α, β та перевірка параметрів контрольних каналів ВС.

Крок 5. Визначення параметрів керування ЕМПК та його запуск при необхідній швидкості потоку в робочій частині АДТ.

Крок 6. Збір даних експериментів (ДЕ), експрес-обробка і аналіз стану ІВС. Якщо ДЕ коректні, то запис їх в БД та перехід на крок 2.

Крок 7. Обробка: визначення розподілених та сумарних аеродинамічних характеристик МЛА; аналіз та документування ДЕ; ін.

Крок 8. Кінець: вихід із програми ЕД.

Вимірювальна підсистема може бути послідовного або паралельного типу. Тиск P_i через ПТ подається на ДТ, виходи якого за допомогою вимірювального каналу ВК підключається до входу АЦП, а потім надходить на регістри комп'ютера К, де відбувається її реєстрація, обробка та аналіз [1, 2].

Алгоритм роботи ВС для одного досліду такий.

Крок 1. Виконуються всі умови досліду ЕД.

Крок 2. Тиск від дренажних отворів по ПТ подається на штуцери ЕМПК.

Крок 3. ЕМПК послідовно підключає ПТ до ДТ, де тиск P_i перетворюється в електричний сигнал u_i.

Крок 4. Електричні сигнали u_i від ДТ подаються на АЦП, які за сигналом від ДС S_i вимірюються.

Крок 5. За сигналом S_i від ДС виконується перетворення аналогового сигналу u_i в цифру і його реєстрація.

Крок 6. Кінець.

При виконанні ЕД за схемою «точка на точку» доцільно застосовувати ВС паралельної дії. Алгоритм їх роботи такий:

Крок 1. Тиск по ПТ ($ПТ_1$, …, ПТn) з дренажних отворів надходить на відповідні ДТ ($ДТ_1$ ... ДТn).

Крок 2. Електричні сигнали з ДТ через відповідні вимірювальні перетворювачі $АЦП_1$ ... АЦПn передаються на комп'ютер Кв.

Крок 3. Отримані по каналах коди одночасно подаються на регістри комп'ютера Кв, де у реальному часі виконується їх обробка.

Крок 4. Результати обробки (основні параметри, результати проміжних обчислень) в обумовленому вигляді виводяться на засоби візуалізації інформації (ЗВІ).

Крок 5. ЕД передаються для подальшої обробки в комп'ютер *Ко*.

Поряд з обробкою Кв здійснює одночасне та незалежне керування кожним каналом у відповідності з алгоритмом вимірювання.

Взаємодія ЕМПК з ВС виконується відповідно до такого алгоритму.

Крок 1. Установка ЕМПК в початкове положення і збір «нульових» показників ДТ.

Крок 2. З приходом команди «Запуск» видається код запуску ЕМПК (починає обертатись ротор ЕМПК).

Крок 3. З приходом сигналу синхронізації S_i від МК виконується реєстрація ДЕ від відповідних ДТ.

Крок 4. З приходом команди «кінець циклу» (КЦ) посилається команда «стоп ЕМПК».

Крок 5. Кінець: вихід з режиму керування ЕМПК.

У розподіленій ВС обмін інформацією між процесорним модулем і ДТ реалізується за допомогою інтерфейсу RS-485/CANbus, які вбудовуються в кожний контролер. Така розподілена ВС є ефективною, оскільки значно скорочує апаратурні витрати, пов'язані з наявністю однотипних блоків.

Методичне забезпечення. Первинна обробка. Обчислюється абсолютне та відносне значення тиску, виконується сортування тиску за розрізами та документуванням результатів ЕД.

Нехай u_{ij} – масив ДЕ ($n \times m$), який еквівалентний відповідним значенням тиску ($u_{1j} \sim P_{sj}$, $u_{2j} \sim P_{ej}$ і $u_{3j} \sim P_{ej}$ для $j = 1, 2, ..., m-1$, $u_{im} \sim q_i$ для $i = 1, 2, ..., n$, $u_{ij} \sim P_{ij}$ для $i = 4, 5, ..., n$, $j = 1, 2, ..., m-1$), де i – номер циклу ЕМПК ($i = 1, 2, ..., n$), j – номер штуцера ЕМПК ($j = 1, 2, ..., m$). Тоді значення тиску визначається через функціонал Z (реалізується у вигляді процедури).

Визначення масиву дійсних значень статичного, еталонного тиску та тиску в будь-якому дренажному отворі МЛА виконується так:

$$P_{sj} = Z_s\left[\sum_{k=0}^{\xi_s} a_k^s u_{1j}^k\right]; \quad P_{ej} = Z_e\left[\sum_{k=0}^{\xi_e} a_k^e \left(\frac{u_{2j} + u_{3j}}{2}\right)^k\right];$$

$$P_{ej} = \begin{cases} Z_d\left[\sum_{k=0}^{\xi_d} a_k^d (u_{ij} - u_{1j})^k\right] & \text{– нелінійні;} \\ \dfrac{P_e}{P_{ej}}(u_{ij} - u_{1j}) & \text{– лінійні функції перетворення,} \end{cases} \qquad (2)$$

де $a_k^{<w>}$, $w = \{s, e, d, q\}$ – коефіцієнти функції перетворення ДТ; $\{\xi_k\}_{k \in w}$ – кількість коефіцієнтів.

Швидкісний напір у робочій частині АДТ постійно пульсує [4], що необхідно враховувати при обробці ДЕ. Тому його величина та відносне значення тиску визначаються так:

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

де μ – коефіцієнти поля АДТ.

Якщо $R_{\eta\lambda}$ – матриця відповідності розміщення дренажних отворів на МЛА та їх підключення до ЕМПК, то $\overline{P}_{\eta\lambda} = Z_g\left[R_{\eta\lambda}\right]$, де $\eta = 1, 2, ...$ – номера перерізів; λ – порядок розміщення дренажних отворів ($\eta \times \lambda \le m \times n$).

Якщо r – число повторів досліду, то середнє значення відносного тиску і його середньоквадратична похибка визначаються так:

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

За результатами вимірювання еталонного тиску була побудована гістограма та перевірена гіпотеза щодо нормального закону розподілу ДЕ за критерієм Пірсона (χ^2). У нашому випадку $\chi = 7.13$, що є прийнятною при надійності $\gamma = 0.95$.

Для оцінки значення відносного тиску за допомогою довірчого інтервалу з надійністю γ використовується розподіл Стьюдента, тобто $(\hat{\bar{P}}_{\eta\lambda} - t_\gamma \frac{\sigma_{\eta\lambda}}{\sqrt{r}}$, $\hat{\bar{P}}_{\eta\lambda} + t_\gamma \frac{\sigma_{\eta\lambda}}{\sqrt{r}})$, де $t_\gamma(\gamma, r)$ – відоме табличне значення.

У випадку повторних дослідів, які виконані в нормально однакових умовах, ДЕ перевіряються на статистичну відтворюваність за критерієм Кохрена: $G = \frac{\sigma^2_{\max}}{\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2}$, де $\sigma^2_{\max} = \max\{\sigma_i\}_{i=1}^{N}$; σ_i^2 – значення дисперсії для i-го досліду (3); N – загальне число дослідів. Якщо $G \le G_t$ для $\nu_1 = m-1$, $\nu_2 = N$, $\alpha = 0,05$, то ДЕ однорідні і похибка ЕД оцінюється як: $\delta^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2$.

На рис.1 показані середньоквадратичні похибки визначення значень тиску в залежності від розміщення дренажних отворів на МЛА та кута α.

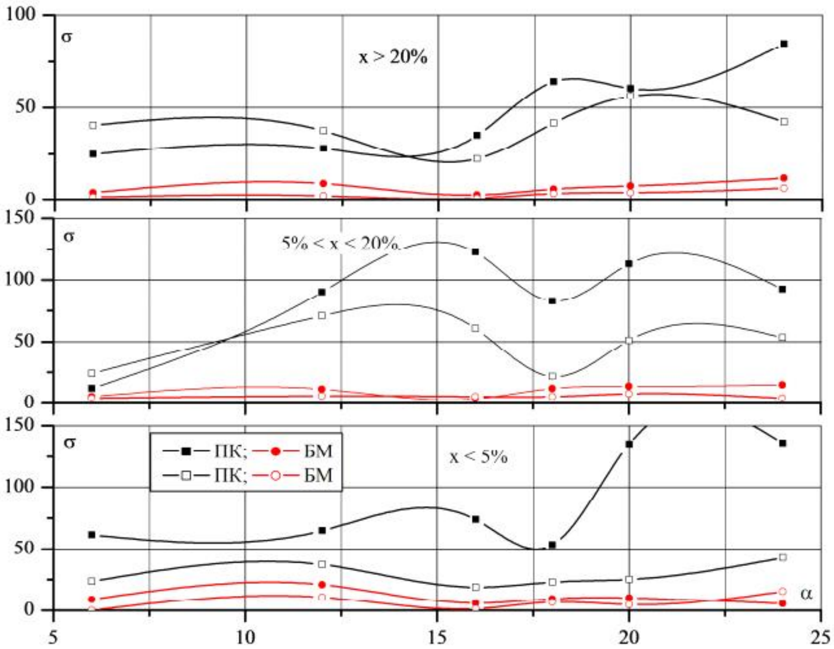

РИС. 1. Залежність похибок від розміщення дренажних отворів

Число Рейнольда за умов ЕД визначається так: $\mathrm{Re} = \sqrt{\dfrac{2gl}{3\nu}}$,

де $\nu = \dfrac{P}{\rho_{15}}(1{,}745 + 0{,}005t)10^{-6}$; $P = \dfrac{0{,}0474P_a}{273{,}15 + t}$; t – температура в АДТ; ρ_{15} – густина повітря при $t = 15^{\circ}C$; P_a – барометричний тиск; l – характерний розмір МЛА.

Вірогідність ЕД забезпечується алгоритмом оперативного контролю роботи ІВС [1]. Реєстрація u_{ij} виконується при коректній роботі технічних засобів системи. ДЕ зберігаються, якщо $\bar{P}$ у контрольних точках коректні. Інакше, дослід повторюється. На рис. 2 показані епюри розподілу відносного тиску в двох перерізах МЛА.

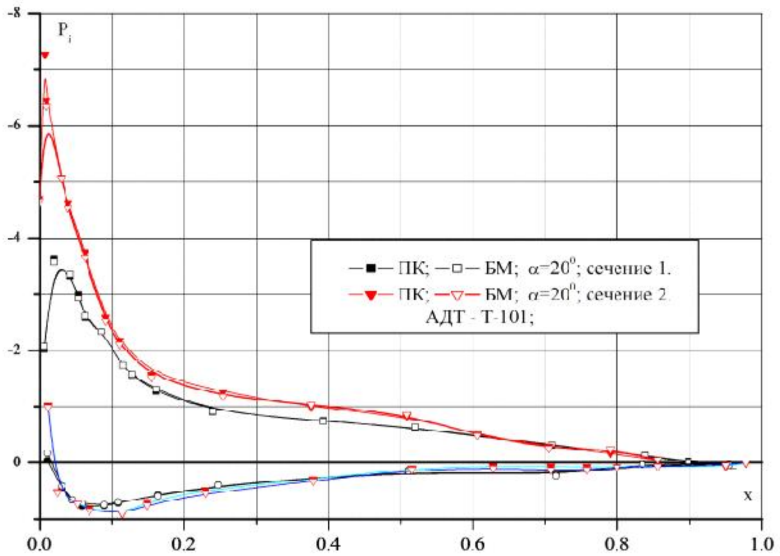

РИС. 2. Епюра розподілу тиску по хорді крила МЛА

Визначення функції перетворення ДТ.

Збільшується точність визначення значень тиску (2) за рахунок представлення функції перетворення ДТ у вигляді полінома (рис. 3):

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

де Y, X – вектор виміряного і заданого значень еталонного тиску; $\hat{Y}$ – вектор наближених значень тиску; m – порядок полінома.

Рівняння (4) визначається з умови мінімальної суми квадратів відхилень між Y і $\hat{Y}$, тобто: $\min Q_p = \sum_{i=1}^{n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2$, де n – число дослідів.

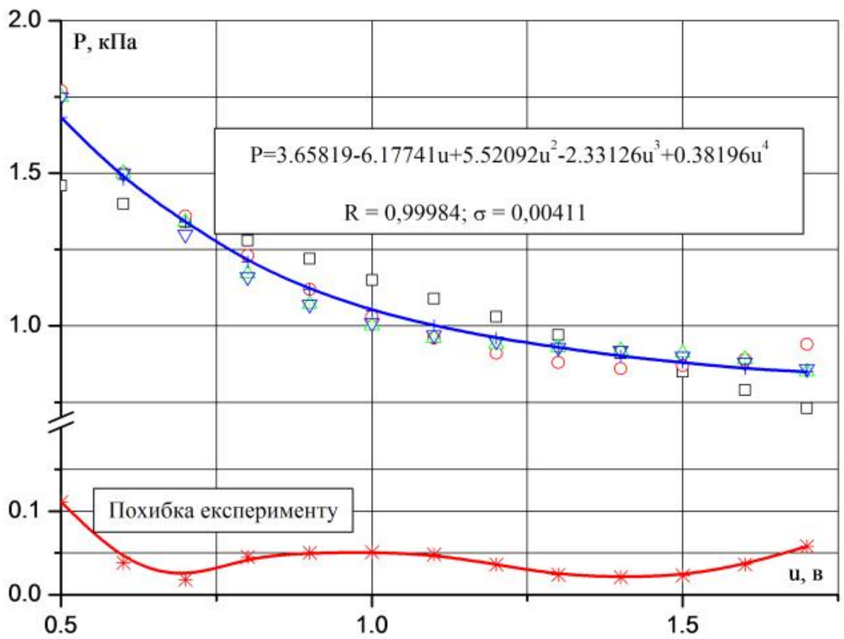

РИС. 3. Функція перетворення ДТ

Якщо x_i, y_i є i-елементом у векторах X і Y, тоді порядки незалежної змінної можна визначити так: $x_{ij} = x_i^j$, де $i = 1,...,n;\ j = 1,...,m.$ Обчислювальний процес для (4) закінчується при $Q_p \le Q_{p+1}$, де $p \le m-1.$ При реалізації методу використовуються співвідношення.

Середнє значення і сума взаємних добутків обчислюються так:

$$\overline{x}_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{ij};\ D_{jk} = \sum_{i=1}^{n}(x_{ij} - \overline{x}_j)(x_{jk} - \overline{x}_k) - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_{ij} - \overline{x}_j)\sum_{i=1}^{n}(x_{ik} - \overline{x}_k),$$

де $j = 1,..., p;\ k = 1,..., p.$

Коефіцієнти кореляції і стандартні відхилення:

$$r_{ij} = \frac{D_{ij}}{\sqrt{D_{ii}D_{jj}}};\ \ S_j = \frac{1}{\sqrt{n-1}}\sqrt{D_{jj}}.$$

Визначення бета-вагів, оцінки коефіцієнтів регресії, вільного члена і коефіцієнта множинної кореляції виконується за такими співвідношеннями:

$$\beta_j = \sum_{i=1}^{k} r_{ij} r_{jj}^{-1};\quad \alpha_j = \beta_j \frac{S_y}{S_j};\quad \alpha_0 = \overline{y} - \sum_{j=1}^{m}\alpha_j \overline{x}_j;\quad R = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\beta_i r_{ij}}.$$

Сума квадратів, яка відноситься до регресії, сума квадратів відхилень від регресії і значення критерію Фішера визначаються так:

$$S_R = R^2 D_{yy}; \quad S_S = D_{yy} - S_R; \quad F = \frac{n-k-1}{k}(S_r / S_s).$$

Дисперсія, стандартна оцінка похибки, стандартні похибки коефіцієнтів регресії та значення коефіцієнтів Стьюдента t_j визначаються так:

$${S_y}^2 = \frac{S_s}{n-k-1}; \quad S_y = \sqrt{{S_y}^2}; \quad S_{aj} = \sqrt{\frac{r_{ij}^{-1}}{D_{ij}}{S_y}^2}; \quad t_j = \frac{a_j}{S_{aj}}.$$

Значущість будь-якого коефіцієнта в (4) оцінюється з використанням t-статистики Стьюдента. Виконання умови $t_i > t_{0.05,n-m-2}$ показує на значимість коефіцієнта регресії a_i. Видалення не значущих коефіцієнтів з (4) потребує перерахунку моделі.

Перевірка значимості (4) виконується за F-статистикою, при якій (4) є значимим, якщо $F > F_{0.05,n-2,1}$. В іншому випадку необхідно змінити порядок (4), перевірити ДЕ або виконати лінійні перетворення незалежної змінної.

Якщо на функцію перетворення ДТ впливають інші фактори (температура, вологість, ін.), то необхідно застосувати оптимальні схеми надання значень факторів впливу в розумінні мінімального числа дослідів, тобто D – оптимальні ПЕ. Порядок проведення дослідів рандомізований, незначне число дослідів у порівнянні з кількістю коефіцієнтів у (4).

Метод реалізований у вигляді такої процедури [2].

Крок 1. Генерація ПЕ і формування таблиць еталонних значень факторів впливу.

Крок 2. Вибір i-го рядка з ПЕ і реальне завдання значень факторів впливу на ДТ.

Крок 3. Збір ДЕ і перевірка наявності похибок в ДЕ. Якщо ПЕ не виконаний, то перехід на крок 2.

Крок 4. Формування i-го рядка матриці X (таблиця еталонних факторів впливу).

Крок 5. Перевірка однорідності ЕД за критерієм Кохрена. Якщо ЕД однорідні, то перехід на крок 7.

Крок 6. Вибір рядка ПЕ з «грубими» похибками і на перехід крок 2 (повтор досліду).

Крок 7. Вибір оптимального (4) і визначення його коефіцієнтів.

Крок 8. Перевірка значимості коефіцієнтів (4), його значущості та адекватності. Якщо критерії не задовольняються, то перехід на крок 7.

Крок 9. Документування функції перетворення ДТ.

Крок 10. Кінець.

Сумарні характеристики. Визначаються коефіцієнти нормальної c_{N_p} і поздовжньої c_{R_p} складові аеродинамічної сили, коефіцієнт повздовжнього моменту m_{Z_p}, відносне положення центра тиску x_d :

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

Далі у зв'язаній системі координат визначаються відповідні коефіцієнти в поточних координатах:

$$c_{Y_p} = c_{N_p}\cos\alpha - c_{R_p}\sin\alpha;\ \ c_{X_p} = c_{N_p}\sin\alpha - c_{R_p}\cos\alpha.$$

Нормальна N і тангенціальна T складові аеродинамічної сили визначаються так: $N = c_n S q_\infty$; $T = c_\tau S q_\infty$, де S – характерна площа МЛА; q_∞ – швидкісний напір у робочій частині АДТ. На рис. 4 показано приклад сумарних характеристик крила МЛА.

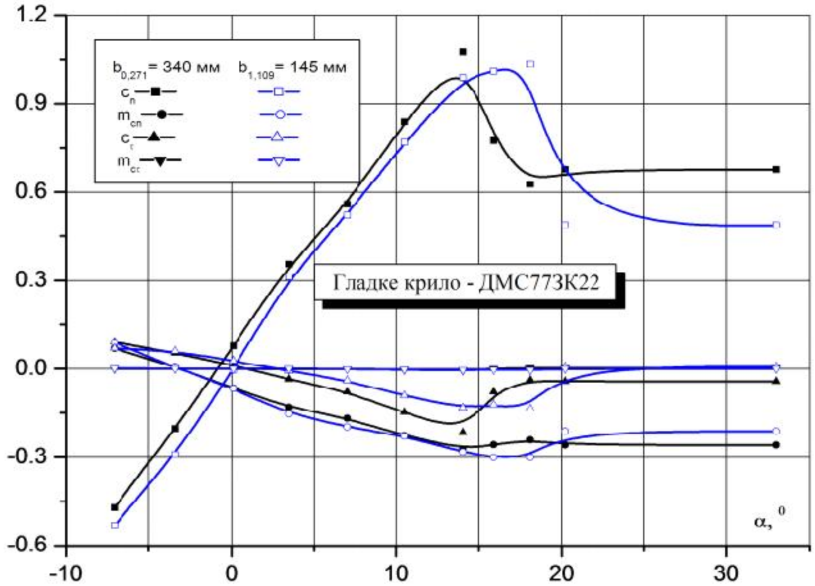

РИС. 4. Сумарні аеродинамічні характеристики МЛА

Проблемою (5) є обчислення інтегралу табличної функції з мінімальною похибкою. Для цього застосовуються методи числового інтегрування [4], де $f(x)$ замінюється інтерполяційною/апроксимаційною функцією $P(x)$, тобто $\int_a^b f(x)dx = \int_a^b P_{n-1}(x)dx + \int_a^b R_{n-1}(x)dx.$

Маємо формулу Ньютона – Котеса, якщо $[a,b]$ поділити на n рівних частин, тобто $x_i = a + h(i-1),\ \ h = (b-a)/n,\ \ i = 0,1,...,n$:

$$\int_a^b f(x)dx \approx (b-a)\sum_{k=1}^{n} H_k y_k,\ \text{де: } y_k = f(a+kh),\ \ t = \frac{x-x_0}{h}. \tag{6}$$

$$H_k = \frac{(-1)^{n-1}}{nk!(n-k)!}\int_0^n \frac{t(t-1)...(t-n)}{t-k}dt,\quad H_k = \text{const},$$

$$R = -\frac{(n!)^4}{[(2n)!]^{2(2n-1)}}(b-a)^{2n+1} f^{(2n)}(\zeta),\ \zeta \in (a,b).$$

При $n = 1$ маємо формулу трапецій

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2n}(y_0 + 2y_1 + 2y_2 + \cdots + 2y_{n-1} + y_n),$$

де $y_k = f\left(a + \frac{b-a}{n}k\right),\ k = 0,1,...,n,\ R = -\dfrac{(b-a)^3}{12n^2} f''(\xi),\ \xi \in (a,b).$

При $n = 2$ (6) та розбивці $[a,b]$ на $2m$ рівних частин маємо формулу Сімпсона:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2m}\left(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + \cdots + 2y_{2m-2} + 4y_{2m-1} + y_{2m}\right),$$

$$R = -\frac{h^5}{90} m f^{(iV)}(\xi),\ \xi \in (a,b).$$

Аналогічно (6) можна побудувати множину наближених виразів типу $\int_{-1}^{1} f(x)dx \approx \sum_{i=1}^{n} B_i f(t_i)$, де B_i – постійні, t_i – відрізки з $[-1,+1]$. Якщо B_i задавати так, щоб вираз був точним для будь-якого полінома порядку $\le n$ при $f(x) \equiv 1$, то матимемо формулу Чебишева:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2}\sum_{i=1}^{n} f(x_i);\ \ x_i = \frac{b+a}{2} + \frac{b-a}{2}t_i;\ \ \sum_{i=1}^{n} t_i^k = \frac{k(k-(-1)^{k-1})}{2(k+1)};\ \ k = 1,2,...,n.$$

Якщо x_i і B_i задавати так, щоб вираз був точними для поліномів $Q(x)$ порядку $\le 2n-1$ ($\omega_n(n) = (x-x_1)(x-x_2)...(x-x_n)$ ортогональні до всіх $Q(x)$ порядку $\le n$, і на $[-1,+1]$ маємо поліноми Лежандра

$P_n(t)=\frac{1}{2^n n!}\frac{d^n(t^2-1)^n}{dt^n}$, корені $t_1, t_2, ..., t_n$ яких дійсні та симетричні), то матимемо формулу Гаусса:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2}\sum_{i=1}^{n} A_i f(x_i), \text{ де } x_i = \frac{b+a}{2}+\frac{b-a}{2}t_i.$$

Формула Георгі:

$$\frac{1}{h}\int_{x_0}^{x_0+nh} f(x)dx = \frac{1}{2}y_0 + y_1 + \cdots + y_{n-1} + \frac{1}{2}y_n + A_2(\Delta y_n - \Delta y_0) - A_3(\Delta^2 y_{n-1} - \Delta^2 y_1) + ...,$$

де $A_k = \int_0^1 \frac{t(t-1)...(t-k+1)}{k!}dt$, при $x_i = x_0 + (i-1)h$ задані $y_i = f(x_i)$ та $\Delta^k y_i$, $i = 0,1,...n$; $k = 1, 2, ..., n$, A_k визначається з такого рекурентного співвідношення:

$$A_0\frac{1}{k} - A_1\frac{1}{k-1} + A_2\frac{1}{k-2} - ... + A_{k-1}(-1)^{k-1} = 0, \quad A_0 = 1.$$

Методи тестувалися на функції $f(x)=\frac{1}{1+x^2}$ на [0,1] (точне значення – π/4 = 0.7853981634; похибки Ньютона – Котеса – 6.28664*10^{-6}/ 2.40812*10^{-8}, Георгі – 4.52093*10^{-5}, Сімпсона – 4.01015*10^{-12}, Ромберга – 2.35630*10^{-12}). Доцільно для розглянутих задач застосовувати метод Ромберга.

Висновки. В роботі розглянуті багатоканальні вимірювачі тиску в АДТ, які можуть застосовуватися як автономно, так і в складі автоматизованих систем. Викладені проблеми експериментальних досліджень спрямовані на одночасне вимірюванням тиску повітря в розподілених отворах на МЛА і в струменях двигунів. Показано, що при проектуванні ІВС необхідно враховувати специфіку засобів багатоканальних вимірювань тиску. Запропоновано найбільш ефективні схеми побудови розподілених ІВС з використанням стандартів: MicroPC, PC-104, ін. Матеріали можуть бути використані при проведенні лабораторних і дослідних робіт в університетах та наукових дослідженнях у промисловості.

С.В. Зинченко, В.П. Зинченко, Н.И. Броварская, А.Ф. Потапенко

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОЦЕССА ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Предложена модель унифицированной информационно-измерительной системы, которая обеспечивает анализ вариантов комплексирования аппаратно-программной среды для организации процесса одновременного многоканального измерения давлений в эксперименте на моделях летательных аппаратов в аэродинамической трубе.

S.V. Zinchenko, V.P. Zinchenko, N.Y. Brovarska, A.F. Potapenko

METHODS AND MEANS FOR HARDWARE AND SOFTWARE EXPERIMENTAL PROCESS MODELING IN A WIND TUNNEL

In this paper, we propose a model of a unified information-measuring system, which provides an analysis of options for interconnecting the hardware and software environment for arranging the process of simultaneous multi-channel pressure measurement in the experimental aircraft models in a wind tunnel.

1. *Зинченко В.П., Зинченко С.В.* Алгоритмы и базовые программные модули для управления технологическими модулями Prometheu. *УСиМ*. 2007. № 5. С. 52 – 60.
2. *Зинченко В.П.* Исследование и реализация алгоритма адаптивного управления экспериментом. *Проблемы управления и информатики*. 2001. № 3. С. 58 – 69.
3. *Гаркуша В.В., Гилев В.М., Запрягаев В.И. и др.* Многоканальное автоматизированное измерение давления в аэродинамическом эксперименте. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014. № 12. С. 158 – 162.
4. *Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И.* Вычислительные методы. В 2-х т. М.: Наука, 1976. Т. 1. 304 с.; 1977. Т. 2. 400 с.

Одержано 07.09.2016

Про авторів:

Зінченко Сергій Валерійович,
науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,

Зінченко Валерій Петрович,
кандидат технічних наук,
НТУУ «КПІ»; доцент, професор ШАУ,

Броварська Наталія Йосипівна,
науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,

Потапенко Алевтина Феліксівна,
молодший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України.