

УДК 519.6+681.327

В.П. Зінченко, канд. техн. наук, доц.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ТЕХНІЧНИЙ ОБ'ЄКТ

Викладено інформаційну технологію експериментального дослідження дії зовнішнього середовища на технічний об'єкт як складову частину інформаційної системи проектних досліджень складних технічних об'єктів. Розглянуто узагальнений алгоритм експериментальних досліджень, інформаційно-вимірювальну систему, методи визначення розподілених характеристик, градуйованих характеристик датчиків тиску сумарних характеристик моделей технічних об'єктів, програмне забезпечення, алгоритми та приклади.

Вступ. Складними та важливими задачами експериментальних досліджень (ЕД) при проектуванні складних технічних об'єктів (ТО), зокрема, авіаційної та космічної техніки, є визначення аеродинамічних характеристик ТО в можливих умовах обтікання їх стиснутою рідиною або газом [1; 2]. Основою таких ЕД є дренажні дослідження, які дозволяють визначити характер обтікання, визначити наявність стрибків ущільнення, структуру суміжного потоку, сумарні аеродинамічні сили та моменти тощо. Для цього використовується складне експериментальне обладнання, зокрема, аеродинамічні труби (АДТ) [1–3].

Для ефективних розрахунків турбулентного тривимірного руху рідин та газів необхідні аналітичні методи. Під час проектування ТО постійно зростає роль числових методів досліджень аеродинамічних характеристик майбутніх ТО. Числові методи і АДТ будуть використовуватися так, щоб вони доповнювали один одного і тим самим сприяли прискоренню проектування нових ТО. Це можливо за рахунок упровадження інформаційних технологій при проектних дослідженнях (ПД) ТО [4].

Постановка задачі. Необхідно розробити ІТЕД дії зовнішнього середовища на ТО як складову частину ІПД ТО, яка б забезпечувала ефективну організацію ЕД, обробку даних експерименту (ДЕ), необхідні метрологічні характеристики, швидкодію та надійність.

В основу ІТЕД покладений такий узагальнений алгоритм ЕД [2]:

$$\begin{array}{ccccccccccc}
 H_i & \rightarrow & M_i & \rightarrow & P_i & \rightarrow & L_i & \rightarrow & \{D_i\} & \rightarrow & I_i & \rightarrow & R_i & \rightarrow \\
 & & & & \uparrow & & \leftarrow & & M_{i+1} & \leftarrow & H_{i+1} & \leftarrow & \downarrow & \\
 & & & & & & & & & & & & & &
 \end{array} \quad (1)$$

H – робоча гіпотеза або очікуваний результат ЕД; **M** – варіант моделі ТО; **P** – програма ЕД; **L** – алгоритм (метод) обробки та аналізу ДЕ; **D** – процес формування ДЕ; **I** – інтерпретація одержаних результатів; **R** – критерій досягнення мети.

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) призначена для підтримки алгоритму (1) і побудована на базі пневмокомутаторів (ПК) та груп пневмодатчиків (ПД) [2; 3; 5]. Ефект ЕД досягається за рахунок автоматичного підключення дренажних точок моделі ТО (наприклад, моделі літального апарата – МЛА) до ПД, високої швидкості ПК та застосування комп'ютерної техніки.

Методика побудови таких систем викладена в роботі [2]. Інформаційно-вимірювальні системи розроблені та впроваджені в промисловій АДТ в 90-х р. і успішно використовуються досі. Такі ІВС потребують модифікації для переходу на сучасну комп'ютерну техніку та інтеграції з сучасними програмними засобами [6].

В інформаційно-вимірювальній системі застосовані персональні електронні обчислювальні машини (ПЕОМ) з мікропроцесорами (МП) типу i80x86 та iPх, які об'єднані в локальну комп'ютерну мережу (К-мережа) стандарту Ethernet. Підключення вимірювальної апаратури до ПЕОМ виконано в стандарті КАМАК [6].

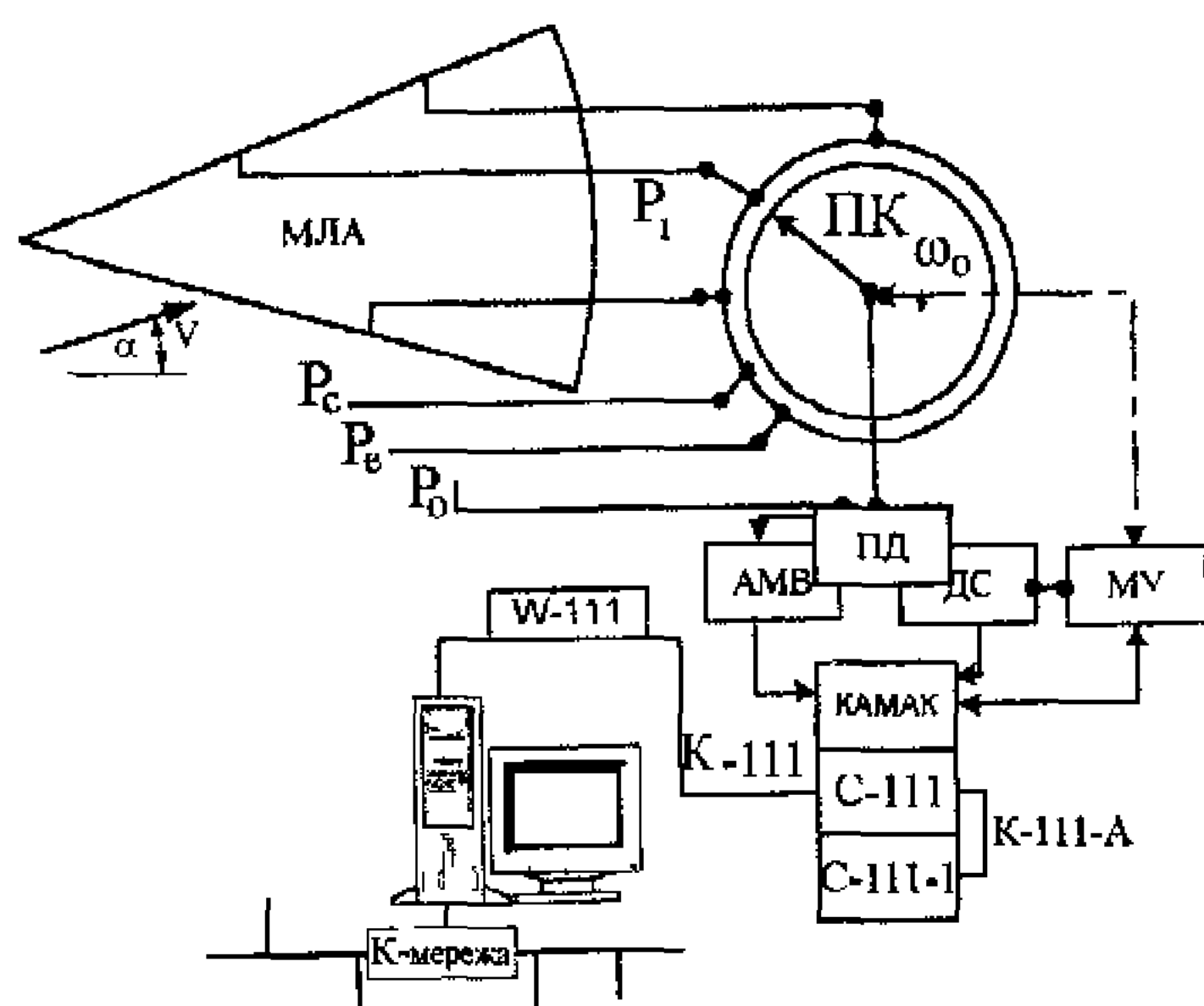


Рис. 1

Аеродинамічна механічна вага виконує вимірювання швидкісного напору, а також забезпечує керування МЛА в робочій частині АДТ. Система дозволяє вимірювати тиск в діапазоні $(0 \div \pm 6 \cdot 10^4)$ Па [2; 3; 5].

Крейт КАМАК до ПЕОМ приєднано за допомогою інтерфейсів С-111 і С-111-1 та модуля W-111. Інтерфейс дозволяє генерувати всі команди КАМАК /N, A, F, Cr/. При цьому ПЕОМ виконує операції запису в оперативну пам'ять (ОП) з адресами DF800h – DFFFh. Контролер прямого доступу в ОП (DMA) забезпечує швидку передачу даних між ОП ПЕОМ та КАМАК без основного МП ПЕОМ. Генерація функцій КАМАК виконується через кожні $\Delta t = \{5, 8, 11, 14\}$ мкс для таких відповідних довжин слів інформації – $\{8, 16, 24, 32\}$ біт.

Основними функціями модуля W-111 є декодування адресного простору ОП в області D0000h – DFFFFh для керування шиною MS/MP, декодування адресного простору портів вводу-виводу ПЕОМ в межах 100h – 1FFh, закриття адрес і даних при генерації функцій КАМАК, буферизація даних вводу-виводу; передача функцій КАМАК у блоковому режимі роботи DMA.

Модуль С-111 реалізує такі функції: запис даних у КАМАК, генерацію функцій КАМАК, читання даних з КАМАК, читання стану L запитів; закриття ліній R, W, F, A, S; керування загальною шиною КАМАК, переривання магістралі ПЕОМ; декодування сигналів EN лінії N, а також закриття ліній L і N.

Для реалізації комплексу програм (КП) керування обміном ЕД між АДТ та ІВС використані програмні модулі з бібліотеки Camac.lib [2; 6].

Програмне забезпечення ІВС включає в себе програмні засоби та операційну систему, які разом з технічними засобами реалізують алгоритм (1). При комплексуванні ПЗ ІВС використані матеріали роботи [7], які дозволяють урахувати показники якості ПЗ, а саме підтримку К-мереж та їх інтеграцію.

Інформаційно-вимірювальна система інтегрує технічне, програмне, методичне і організаційне забезпечення з метою реалізації алгоритму (1) та розв'язку таких задач [2; 3]:

- проведення ЕД в реальному часі;
- запис даних з носіїв інформації, вимірювальних каналів та їх розміщення в БД системи;
- обробку, аналіз та документування ДЕ (таблиці, графіки);
- контроль технічних засобів та ДЕ в темпі ЕД;
- передачу ДЕ для використання в підсистемах автоматизованого проектування ТО.

Загальний алгоритм роботи ІВС наведений в роботах [2; 3].

Крок 1. Перевірка технічних засобів і підготовка вхідних даних.

Крок 2. Розв'язок задачі адаптивного керування ПК з метою визначення попередніх параметрів керування ПК [5].

Крок 3. Запуск КП керування ЕД та вибір необхідного дослід з плану ЕД (ПЕ). Якщо ПЕ виконаний, то необхідно перейти на крок 7.

На рис. 1 показано аеродинамічні механічні ваги (АМВ), датчики синхроімпульсів (ДС) ПК, модуль керування (МК) ПК, швидкість потоку в робочій частині АДТ V_∞ , кут атаки МЛА α , тиск у форкамері P_0 , швидкість обертання ротора ПК ω , статичний P_c та динамічний P_u тиск, вимірюваний тиск в i -й дренажній точці P_i , опорний P_s та еталонний P_e тиск $(-4,9 \cdot 10^3 \pm 10)$ Па.

В інформаційно-вимірювальній системі ПК виконує послідовне підключення дренажних точок МЛА до ПД, яке вимірює значення тиску і перетворює його в напругу u_i (вихідний сигнал).

Аеродинамічна механічна вага виконує вимі-

Крок 4. Установка заданих в ПЕ кутів (α_{fx}, β_{fx}) МЛА та перевірка значень показників у контрольних каналах системи.

Крок 5. Визначення параметрів керування ПК та його запуск з досягненням необхідної швидкості потоку в робочій частині АДТ.

Крок 6. Збір ДЕ, експрес-обробка і аналіз стану технічних засобів ІВС. Якщо ДЕ коректні, то необхідно записати їх в БД та перейти на крок 2.

Крок 7. Обробка (визначення розподілених та сумарних аеродинамічних характеристик МЛА), аналіз та документування ДЕ.

Крок 8. Кінець. Вихід з середовища КП керування ЕД на верхній рівень ПЗ системи.

У результаті роботи ІВС в БД системи розміщуються ДЕ та такі дані: кількість і тип ПК, ГрХ ПД, таблиці відповідності; координати дренажних точок та умовних перерізів ТО, умови ЕД (номер досліду, значення кутів атаки α і ковзання β тощо) [2].

Метод визначення розподілених характеристик дозволяє за ДЕ обчислити тиск за відповідним ГрХ ПД, визначити відносне значення тиску, виконати сортування значень тиску за розрізами, документувати ДЕ у вигляді таблиць і графіків.

Нехай u_{ij} – масив ДЕ розміром $n \times m$, який еквівалентний відповідним фізичним величинам:

$$u_{1j} \sim P_{sj}, u_{2j} \sim P_{ej}, u_{3j} \sim P_{ej} \text{ для } j = 1, 2, \dots, m - 1;$$

$$u_{im} \sim q_i \text{ для } i = 1, 2, \dots, n;$$

$$u_{ij} \sim P_{ij} \text{ для } i = 4, 5, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m - 1,$$

де i – номер циклу ПК ($i = 1, 2, \dots, n$); j – номер точки в ряду ПК ($j = 1, 2, \dots, m$).

Для визначення відповідних значень тиску використовується функціонал Z , який реалізований у вигляді відповідних процедур.

Визначення масиву дійсних значень статичного, еталонного тиску та тиску в будь-якій дренажній точці МЛА виконується так:

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

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

$$P_{ej} = \begin{cases} Z_d \left[\sum_{k=0}^{\xi_d} a_k^d (u_{ij} - u_{1j})^k \right] & \text{для нелінійних ГрХ;} \\ \frac{P_e}{P_{ej}} (u_{ij} - u_{1j}) & \text{для лінійних ГрХ,} \end{cases} \quad (2)$$

де $a_k^{<w>}$, $w = \{s, e, d, q\}$ – коефіцієнти ГрХ ПД; ξ_k – кількість відповідних коефіцієнтів.

Швидкісний напір у робочій частині АДТ постійно пульсує (рис. 2), що необхідно враховувати при обробці ДЕ. Тому його величина та відносне значення тиску в дренажних точках МЛА визначається так:

$$q_i = Z_q \left[\sum_{k=0}^{\xi_q} a_k^q (u_{im} - u_{1m})^k \right];$$

$$\bar{P}_{ij} = Z_0 \left[\frac{P_{ij}}{\mu q_i} \right],$$

де μ – коефіцієнти поля АДТ.

Якщо $R_{\eta\lambda}$ – матриця відповідності розміщення дренажних точок на МЛТ та підключення їх до статора ПК, то

$$\bar{P}_{\eta\lambda} = Z_g [R_{\eta\lambda}],$$

де $\eta = 1, 2, \dots$ – номери перерізів на МЛА; λ – порядок розміщення дренажних точок у перерізі за годинниковою стрілкою ($\eta \times \lambda \leq m \times n$).

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

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

За ДЕ вимірювання еталонного тиску була побудована гістограма та перевірена справедливості гіпотези про нормальний закон розподілу ДЕ на основі критерію узгодження Персона (χ^2). У нашому випадку $\chi = 7,13$, що відповідає допустимим значенням при надійності $\gamma = 0,95$ [8].

Для оцінки невідомого значення відносного тиску за допомогою довірчого інтервалу з надійністю γ використовується розподіл Стюдента, 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 $t_\gamma(\gamma, r)$ береться з відповідної таблиці [8].

У випадку повторних дослідів, які виконані в нормально однакових умовах, ДЕ перевіряються на статистичну відтворюваність за критерієм Кохрена [8]:

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

де $\sigma_{\max}^2 = \max\{\sigma_i\}_{i=1}^N$; σ_i^2 – значення дисперсії для i -го дослідів (3); N – загальна кількість дослідів.

Якщо $G \leq G_\alpha$, взятого з таблиць 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. 3 показані середньоквадратичні похибки визначення значень тиску для різних α залежно від розміщення дренажних точок на МЛА.

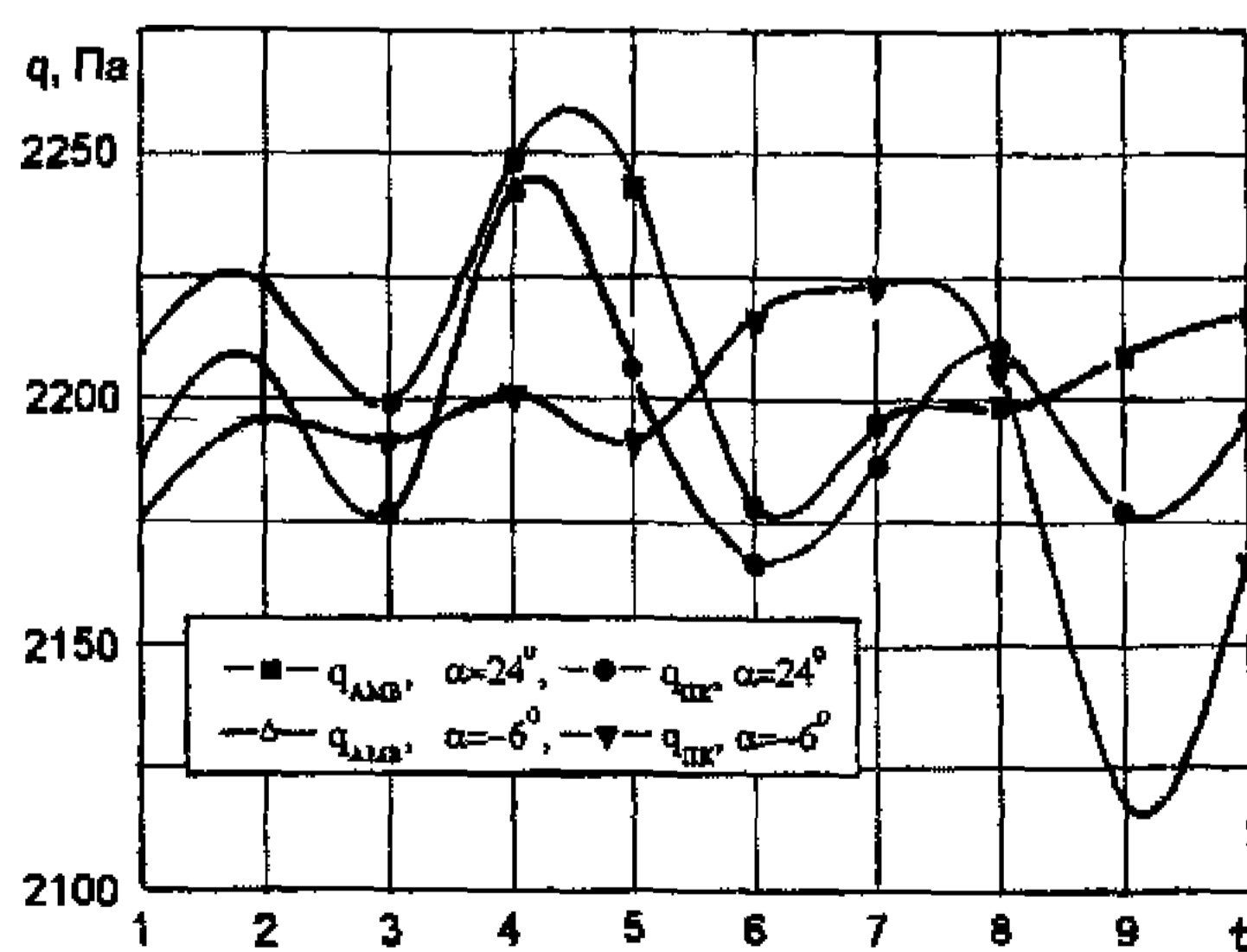


Рис. 2

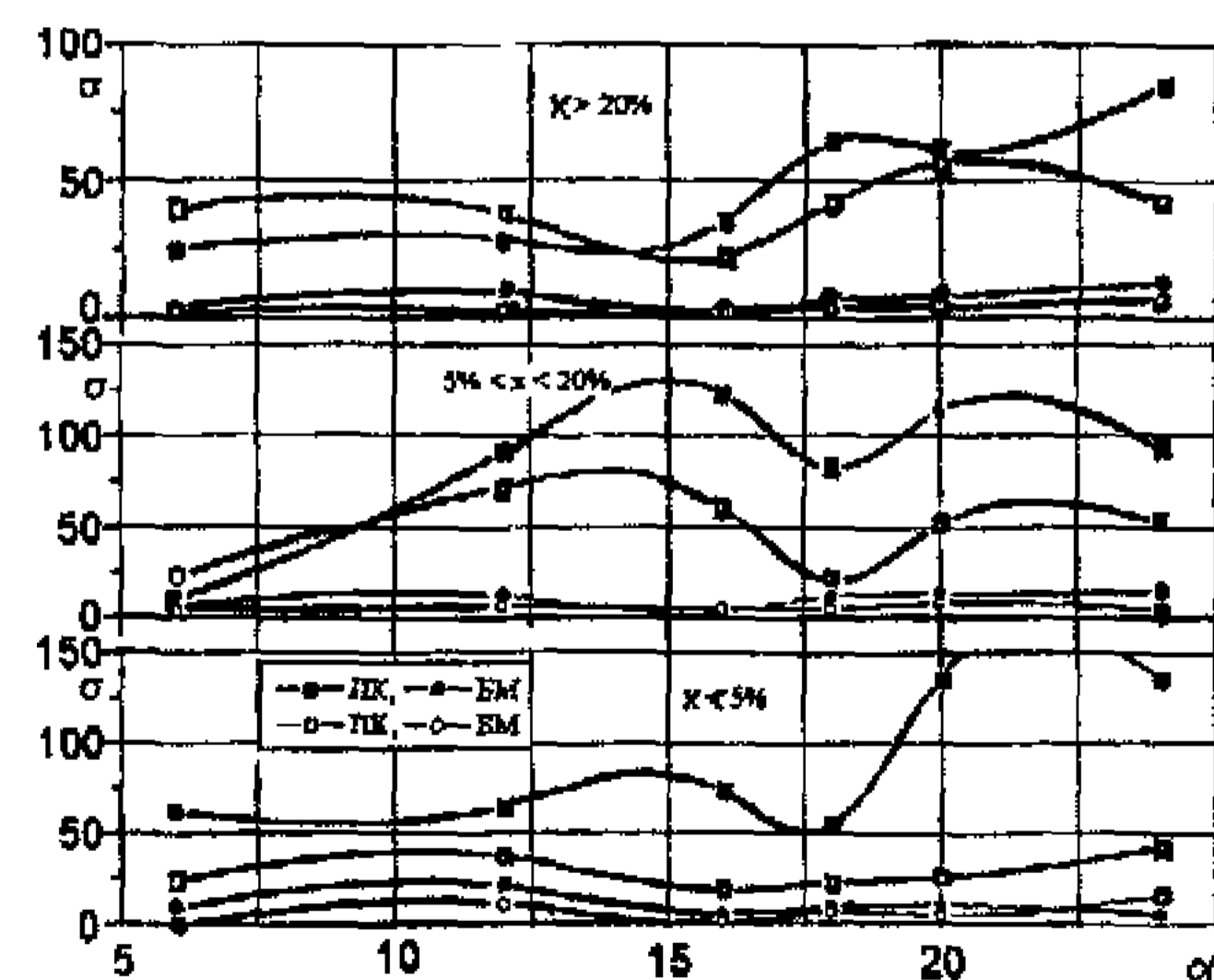


Рис. 3

Число Рейнольдса в умовах ЕД визначається так:

$$Re = \sqrt{\frac{2gl}{3\nu}}$$

$$\nu = \frac{P}{\rho_{15}} (1,745 + 0,005t) 10^{-6},$$

$$P = \frac{0,0474P_a}{273,15+t},$$

t – температура в АДТ; ρ_{15} – густина повітря при $t = 15^\circ\text{C}$; P_a – барометричний тиск; l – характерний розмір МЛА.

На рис. 4 показаний типовий приклад епюри розподілу відносного тиску в двох різних перерізах МЛА.

Суттєвим питанням для викладеного методу є наявність коректних ДЕ, що забезпечується алгоритмом оперативного контролю функціонування ІВС [2; 3; 5]. Зазначимо, що регуляція u_y виконується при коректній роботі технічних засобів системи. Запис же ДЕ в БД системи виконується після визначення \bar{P} в контрольних точках і перевірки їх коректності. Якщо це не так, то дослід повторюється [2; 3].

Метод визначення ГрХ ПД дозволяє збільшити точність обчислення значень тиску (2) за рахунок представлення їх у вигляді поліномів [8] (рис. 5):

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

\hat{Y} – вектор обчислених наближених значень тиску; m – заданий найвищий порядок; x^i – вектор значень еталонного тиску.

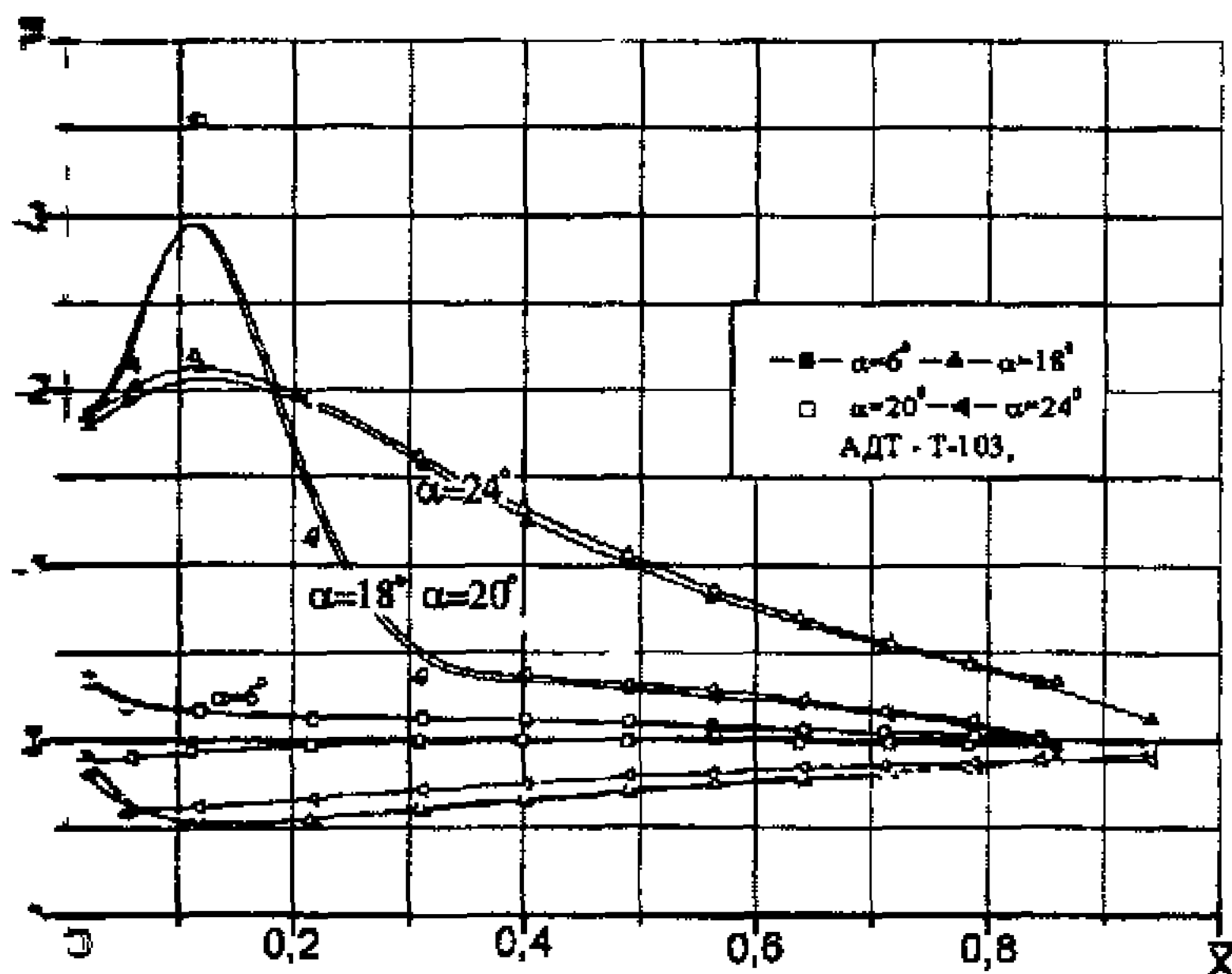


Рис. 4

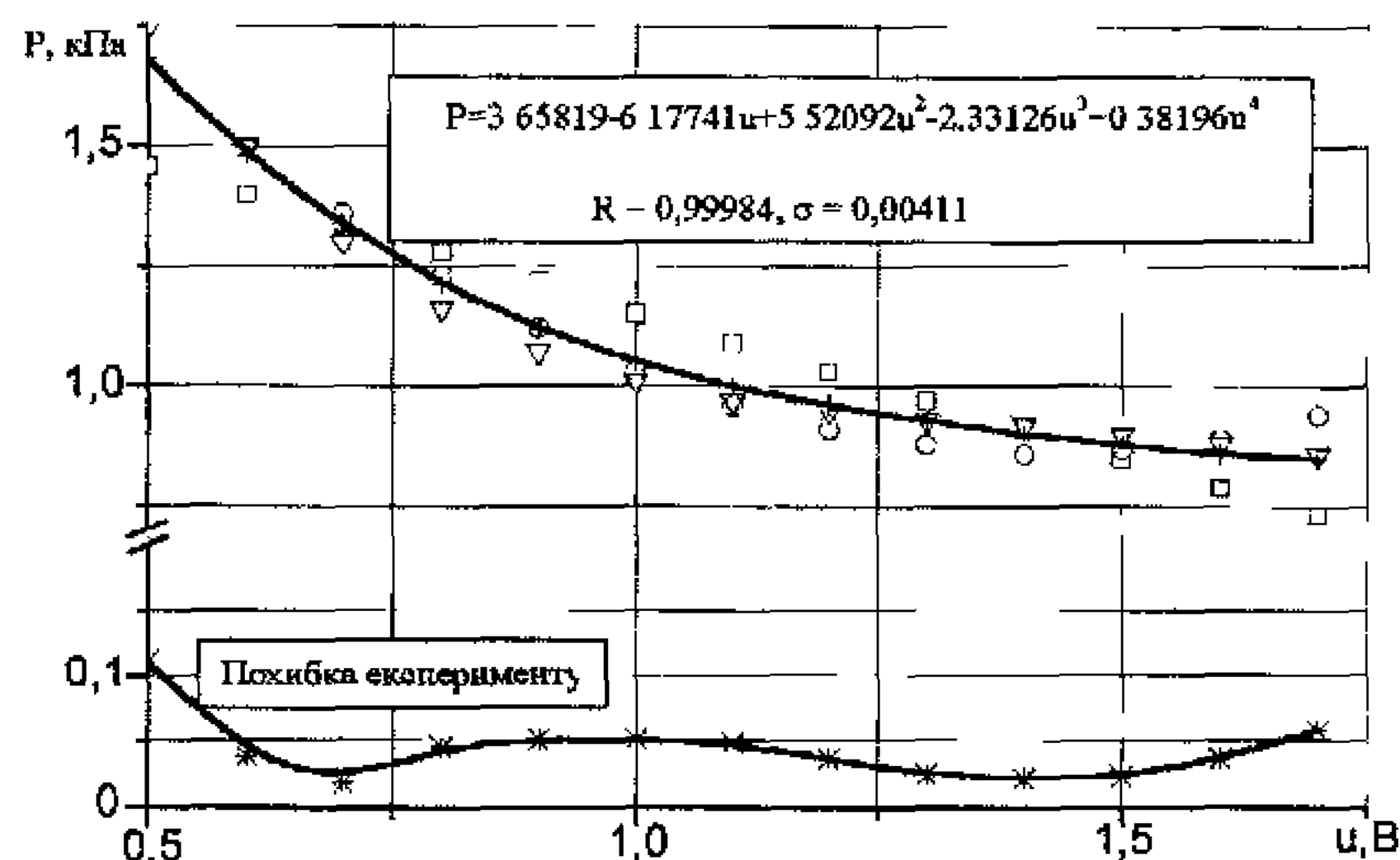


Рис. 5

Рівняння (4) визначається з умови мінімальної суми квадратів відхилень між вектором справжніх значень тиску Y і вектором обчислених наближених значень тиску \hat{Y} , тобто

$$\min Q_p = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \tag{5}$$

n – кількість дослідів.

Якщо x_i, y_i є i -елементами у векторах X і Y , то порядки незалежної змінної можна визначити так:

$$x_{ij} = x_i^j,$$

$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m.$

Обчислювальний процес для виразу (4) закінчується при $Q_p \leq Q_{p+1}$, де $p \leq m-1$.

Середнє значення і сума взаємних добутоків від середніх значень обчислюються так:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij};$$

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

де $j = 1, \dots, p; k = 1, \dots, p$.

Коефіцієнти кореляції і стандартні відхилення розраховують за формулами:

$$r_{jy} = \frac{D_{jy}}{\sqrt{D_{jj} D_{yy}}};$$

$$S_j = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{D_{jj}}.$$

Визначення бета-вагів, оцінок коефіцієнтів регресії, вільного члена і коефіцієнта множинної кореляції виконується з використанням таких відповідних співвідношень:

$$\beta_j = \sum_{i=1}^k r_{ij} r_{iy}^{-1}; \alpha_j = \beta_j \frac{S_y}{S_j};$$

$$\alpha_0 = \bar{y} - \sum_{j=1}^m \alpha_j \bar{x}_j;$$

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \beta_i r_{iy}}.$$

Сума квадратів, яка відноситься до регресії, сума квадратів відхилень від регресії і значення критерію Фішера для аналізу дисперсії визначаються за формулами:

$$S_R = R^2 D_{yy};$$

$$S_S = D_{yy} - S_R;$$

$$F = \frac{n-k-1}{k} (S_R / S_S).$$

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

$$S_y^2 = \frac{S_S}{n-k-1};$$

$$S_y = \sqrt{S_y^2};$$

$$S_{aj} = \sqrt{\frac{r_{ij}^{-1}}{D_{jj}} S_y^2};$$

$$t_j = \frac{a_j}{S_{aj}}.$$

Значущість будь-якого коефіцієнта в рівнянні (4) оцінюється за допомогою t -статистики Стюдента. Виконання умови $t_i > t_{0.05, n-m-2}$ показує на значущість коефіцієнта регресії a_j . Видалення незначущих коефіцієнтів з рівняння (4) потребує перерахунку моделі без їх врахування.

Перевірка значущості рівняння (4) виконується на основі F -статистики. Поліном (4) є значущим при $F > F_{0.05, n-2, 1}$. У іншому випадку необхідно змінити максимальний ступінь (4), перевірити ДЕ або виконати лінійні перетворення незалежної змінної.

Якщо апріорно відомий оптимальний ступінь полінома ГрХ ПД, то ЕД необхідно проводити в таких точках:

$$x_1 = a; x_i = x_1 + \frac{|b-a|}{m}(i-1),$$

де $i = 1, 2, \dots, m+1$; a, b – нижнє та верхнє значення діапазону ПД.

Якщо на ГрХ ПД впливають інші, наприклад, зовнішні фактори (температура, вологість тощо), то для її визначення необхідно застосувати метод, в основу якого покладена методологія математичної теорії планування експерименту, яка дозволяє побудувати оптимальні системи завдання значень факторів впливу в розумінні мінімальної кількості дослідів і максимальної інформативності [8].

Експериментальні дослідження виконуються відповідно до D – оптимального ПЕ (табл. 1). Порядок проведення дослідів рандомізований, що дозволяє оцінити випадкові похибки та уникнути систематичних похибок. План експерименту має незначну кількість дослідів у порівнянні з кількістю коефіцієнтів у рівнянні (4). Наприклад, ПЕ B_3 з «напівреплікою» (на кубі) складається з 15 дослідів (табл. 1) для тривимірного простору факторів при варіюванні незалежними змінними на трьох рівнях.

Таблиця 1

Фактор	Дослід														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
x_1	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	0	0	0	0	0
x_2	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	0	0	0
x_3	-	-	-	-	+	+	+	+	0	0	0	0	-	+	0

Кількість повторних дослідів η в ПЕ дорівнює двом, тому що збільшення η до трьох зменшує межі довірчого інтервалу при обчисленні його за t -критерієм Стюдента (при рівні значущості $\alpha = 0,05$) на 4,9%. При цьому критерій Фішера зменшує зону невизначеності при перевірці полінома (4) на адекватність приблизно на 7%, а трудомісткість ЕД зростає на 33% [8].

Метод реалізовано у вигляді такої уніфікованої крокової процедури [2; 8].

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 відповідні компоненти ПД.

Крок 3. Збір ДЕ і перевірка наявності похибок в ДЕ. Якщо ПЕ не виконується, то необхідно перейти 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 необхідно перейти на крок 7.

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

Крок 7. Вибір значення порядку в рівнянні (4) і визначення (4).

Крок 8. Перевірка значущості коефіцієнтів у рівнянні (4), значущості (4) та її адекватності. Якщо критерії не задовольняються, то необхідно перейти на крок 7.

Крок 9. Документування коефіцієнтів та характеристик поліному (4) ПД (таблиці, графіки).

Крок 10. Кінець.

Комп'ютерні програми, які реалізують крокову процедуру визначення ГрХ ПД надані в роботах [2; 8]. Модельний приклад розв'язку задачі (4) у середовищі MathCad [6] показаний на рис. 6. Дані експерименту впроваджені в MathCad із Excel, що обумовлено інтеграцією цих двох систем.

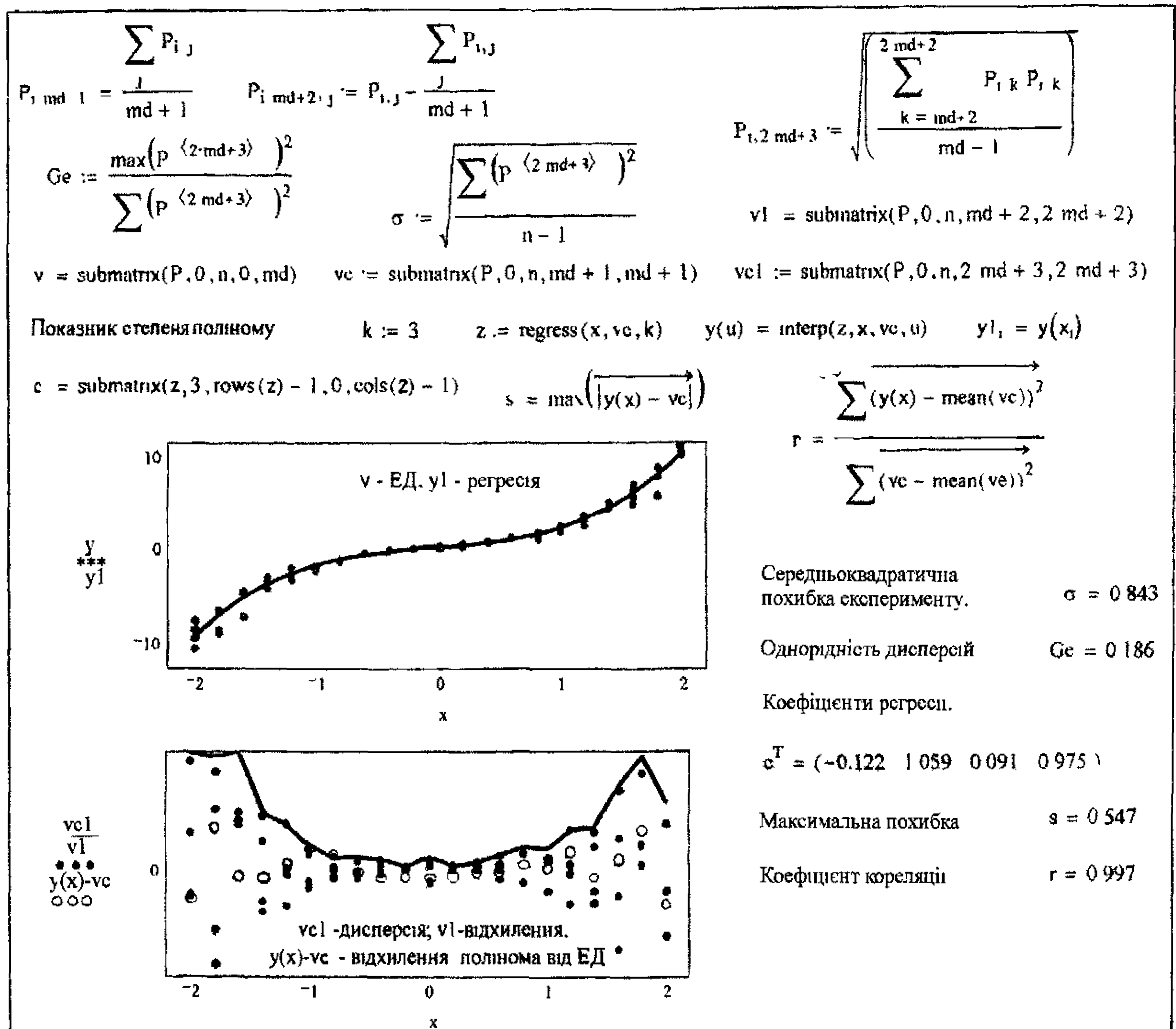


Рис. 6

Метод визначення сумарних характеристик дозволяє за відомим з ЕД значенням $\bar{P}_i(2)$ визначити значення сумарних аеродинамічних коефіцієнтів ТО, а саме коефіцієнтів нормальної c_{Np} і поздовжньої c_{Rp} складових аеродинамічної сили, коефіцієнта поздовжнього моменту m_{Zp} , відносно положення центру тиску x_d :

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

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

$$m_{Zp} = \frac{1}{2} \oint \bar{P}(\bar{x}) d\bar{x} - \frac{1}{2} \oint \bar{P}(\bar{y}) d\bar{y};$$

$$\bar{x}_d = -\frac{m_{Zp}}{c_{Np}}.$$

(6)

Криволінійні інтеграли обчислюються при умові, що позитивним є напрямком обходу профілю перерізу проти годинникової стрілки.

За знайденими аеродинамічними коефіцієнтами у зв'язаній системі координат визначаються відповідні коефіцієнти в поточних координатах:

$$c_{Yp} = c_{Np} \cos \alpha - c_{Rp} \sin \alpha;$$

$$c_{Xp} = c_{Np} \sin \alpha - c_{Rp} \cos \alpha.$$

Нормальна N , тангенціальна T складові аеродинамічних сил, які діють на елемент конструкції МЛА, визначаються так:

$$N = c_n S q_\infty;$$

$$T = c_\tau S q_\infty,$$

де S – площа елемента конструкції МЛА; q_∞ – швидкісний напір у робочій частині АДТ.

Для обчислення визначеного інтеграла табличної функції з мінімальною похибкою застосовуються методи числового інтегрування [9], де $f(x)$ замінюється інтерполяційною (апроксимаційною) функцією $P(x)$ простого вигляду:

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

Якщо при $h = (b - a)/n$ поділити $[a, b]$ точками $x_i = a + h(i - 1)$ на n рівних частин, де $y_i = f(x_i)$, $dx = h dt$, $i = 0, 1, \dots, n$, то маємо формулу Ньютона-Котеса:

$$\int_a^b f(x) dx \approx (b - a) \sum_{k=1}^n H_k y_k;$$

$$y_k = f(a + kh);$$

$$H_k = \frac{(-1)^{n-1}}{nk!(n-k)!} \int_0^n \frac{t(t-1)\dots(t-n)}{t-k} dt;$$

$$t = \frac{x - x_0}{h},$$

$$\text{якщо } H_k = \text{const};$$

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

При $n = 1$ маємо формулу трапецій:

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

$$\text{якщо } y_k = \left(a + \frac{b-a}{n} k \right), \quad k = 0, 1, \dots, n;$$

$$R = -\frac{(b-a)^3}{12n^2} f''(\xi), \quad \xi \in (a, b).$$

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

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

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

Аналогічно до формули (7) можна одержати нескінченну множину наближених формул такого 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 $[-1, +1]$.

Чебишев запропонував задавати B_i так, щоб формула була точною для будь-якого полінома степеня не вище n при $f(x) \equiv 1$, тобто:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i);$$

$$x_i = \frac{b+a}{2} + \frac{b-a}{2} t_i;$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^n t_i^k = \frac{k(k - (-1)^{k-1})}{2(k+1)}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \right.$$

Гаус запропонував для формул типу

$$\int_a^b f(x) dx \approx A_1 f(x_1) + A_2 f(x_2) + A_3 f(x_3) + \dots + A_n f(x_n)$$

значення x_i і A_i обчислювати так, щоб вони були точними для всіх поліномів $Q(x)$ степеня не вище $N = 2n - 1$. При цьому поліном

$$\omega_n(x) = (x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n)$$

є ортогональним до всіх поліномів $Q(x)$ степеня меншого, ніж n :

$$\int_a^b \omega_n(x) Q(x) dx = 0.$$

На $[-1, +1]$ система поліномів є поліномами Лежандра:

$$P_n(t) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n (t^2 - 1)^n}{dt^n}, \quad n = 0, 1, \dots,$$

корені (t_1, t_2, \dots, t_n) яких дійсні, різні і розміщені симетрично відносно $t = 0$. Тому квадратурна формула Гауса має вигляд [9]:

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

де $x_i = \frac{b+a}{2} + \frac{b-a}{2} t_i$.

Формула Георгі має вигляд:

$$\frac{1}{h} \int_{x_0}^{x_0+nh} f(x) dx = \frac{1}{2} y_0 + y_1 + \dots + y_{n-1} + \frac{1}{2} y_n + A_2(\Delta y_n - \Delta y_0) - A_3(\Delta^2 y_{n-1} - \Delta^2 y_1) + \dots + A_k(\Delta^2 y_n - \Delta^2 y_k) + \dots \quad (8)$$

$$A_k = \int_0^1 \frac{t(t-1) - (t-k+1)}{k!} dt.$$

При $x_i = x_0 + (i-1)h$ задані значення $y_i = f(x_i)$ та різниці $\Delta^k y_i$ при $i=0,1,\dots,n$; $k=1,2,\dots,n$, а для визначення A_k застосовується таке рекурентне співвідношення:

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

Похибка формули Грегорі така ж, як і у формулі (7), а формула (8) є іншим представленням формули (7).

Методи числового інтегрування були перевірені при інтегруванні функції

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

[0.1] (табл. 2), звідки видно, що найкращим є метод Ромберга.

Таблиця 2

Процедури (методи) інтегрування	$\int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx$	R
Точне значення інтеграла	$\pi/4 = 0.7853981634$	0
P_0509 Н.-К.	0.7853918767	$6.28664 \cdot 10^{-6}$
P_0510 Н.-К.	0.7853981874	$2.40812 \cdot 10^{-8}$
P_0508b Грегорі	0.7854433727	$4.52093 \cdot 10^{-5}$
P_0513a Сімпсона	0.785398163393	$4.01015 \cdot 10^{-12}$
P_0514b Ромберга	0.785398163399	$2.35630 \cdot 10^{-12}$

Модельний приклад визначення сумарних аеродинамічних коефіцієнтів ТО в середовищі MathCad показаний на рис. 7, 8. Наведені приклади мають наглядний вигляд для експериментатора, особливо – при відпрацюванні специфічних методів визначення сумарних аеродинамічних коефіцієнтів.

Програмне забезпечення ІВС реалізує викладені методи, а також дозволяє графічно зобразити епюри розподілу тиску $\bar{P} = f(\bar{x})$ по окремих елементах МЛА (основній частині, закрутці, елерону тощо) визначати сумарні аеродинамічні характеристики перерізів МЛА та МЛА в цілому. На рис. 9 показаний приклад графічного зображення епюри розподілу тиску по гладкому крилу МЛА.

Програмне забезпечення системи функціонує під керуванням ОС Windows, виконано за модельним принципом і об'єднано в окремі КП. Мови програмування – Fortran, C, Pascal і Assembler.

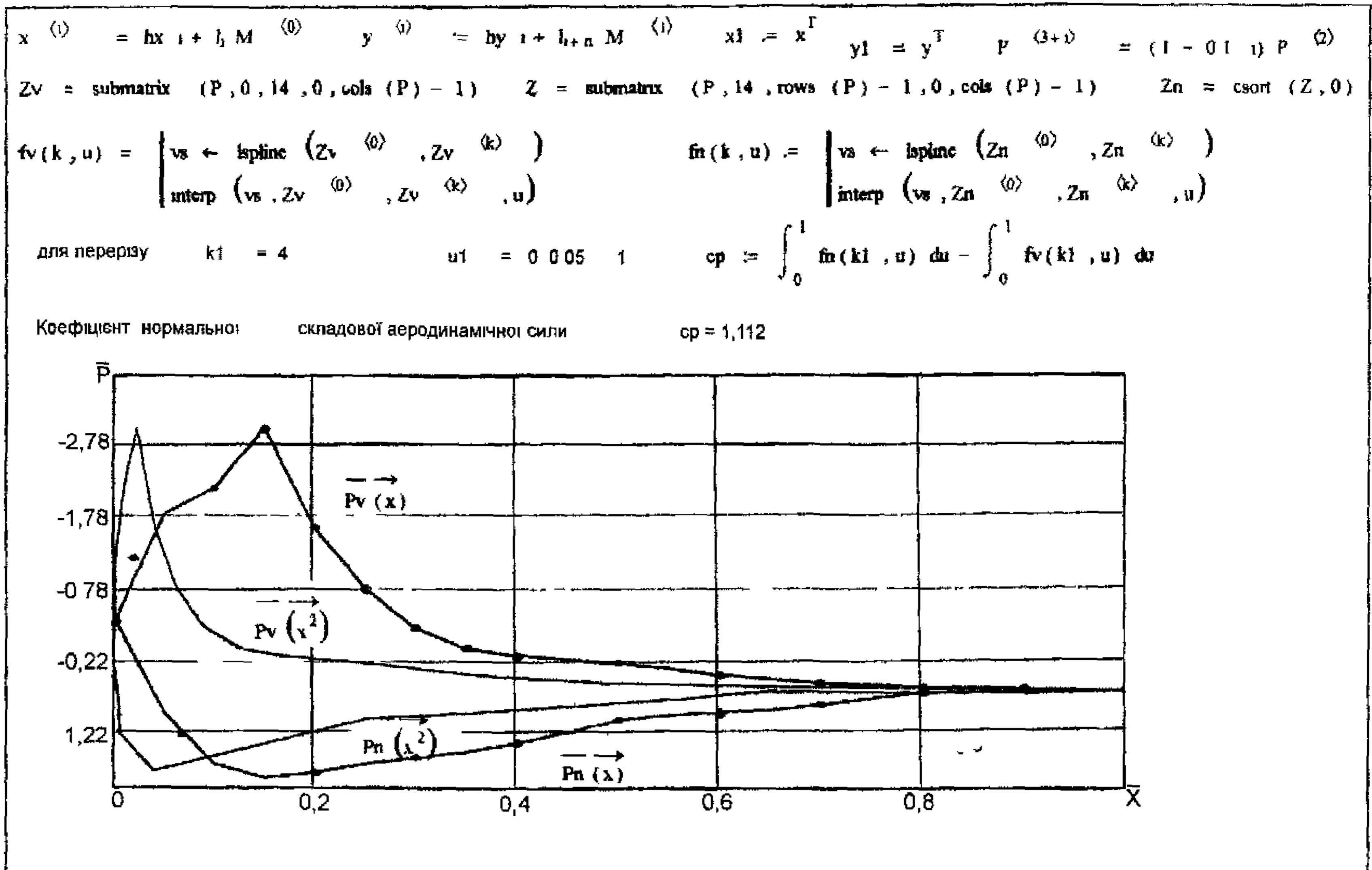


Рис. 7

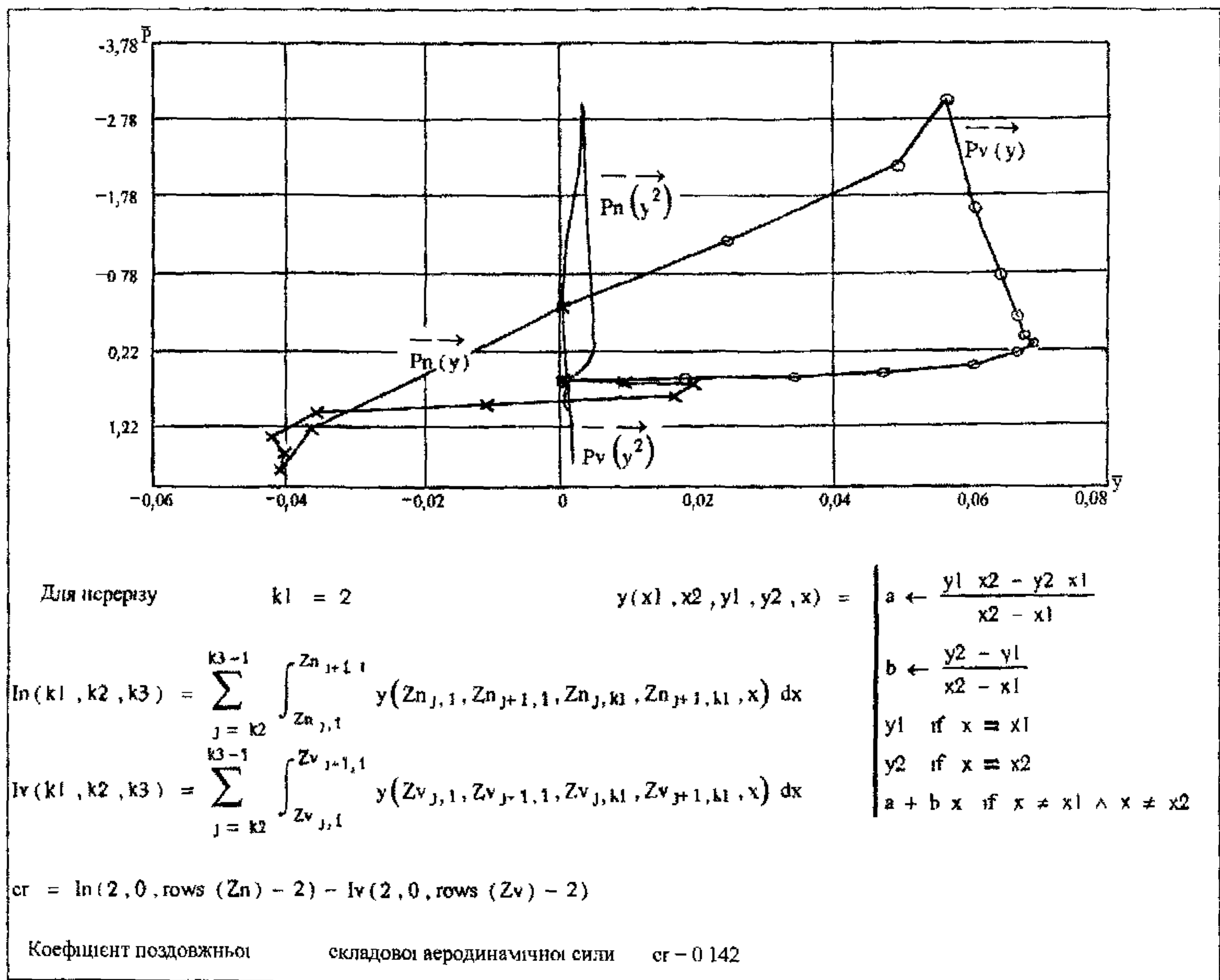


Рис. 8

Функціональні можливості ПЗ такі: підготовка даних, настройка і перевірка технічних засобів ІВС; керування ЕД і оперативний контроль технічних засобів ІВС. збір, зберігання і коректування ДЕ, визначення, історична обробка, обробка кратних досліджень, документування у вигляді таблиць та графіків.

Структура БД системи заснована на визначеному відношенні наборів даних [2]. Кожний набір даних являє собою файл з фіксованою структурою. Набір таких файлів в БД системи дозволяє ефективно і просто організувати керування ДЕ.

Взаємодія ПЕОМ системи з вимірювальною апаратурою по ДЕ організовано відповідно до такого алгоритму.

Крок 1. Установка ПК у вихідне положення і збір «нульових» показників ПД.

Крок 2. З приходом команди «Запуск» у відповідний канал видається код запуску ПК. Двигун ПК починає повертати ротор ПК.

Крок 3. З кожним приходом сигналу синхронізації C_i від МУ ПК виконується реєстрація показників ПД по відповідних інформаційних каналах.

Крок 4. З приходом команди «Кінець циклу» обчислювач через МУ посилає команду на зупинку двигуна ПК.

Крок 5. Кінець. Вихід із середовища КП керування ПК на верхній рівень ПК керування ЕД.

Висновок. У результаті розробки методів, алгоритмів, ПЗ та технічних засобів реалізовано ІТЕД як складова частина ІППД ТО [4]. Ефективність ІТ досягається за рахунок скорочення термінів ЕД, обробки, аналізу та документування ДЕ, планування ЕД. Трудоемність окремих операцій зменшуються в 10 ... 50 разів, що призводить до скорочення загального часу проектування ЛА. Інформаційна технологія дозволяє використати результати ЕД на різних етапах проектування ТО. Використання MathCad дозволяє виконати той чи інший етап обробки ДЕ, відпрацювати нові алгоритми тощо.

Список літератури

1. *Авиация: Энциклопедия*/ Гл. ред. Г.П. Свищев. – М.: Большая Российская энцикл., 1994. – 736 с.
2. *Системы автоматизации экспериментальных исследований в аэродинамических трубах* / В.М. Египко, В.П. Зинченко, Б.Н. Белоусов, Ф.Н. Горин. – К.: Наук. думка, 1992. – 264 с.
3. *Зинченко В.П.* Исследование характеристик информационно-измерительной системы регистрации давления // Вестн. НТУУ «КПИ». – К.: Машиностроение. 2000. – Вып. 39. – С. 313–321.
4. *Зинченко В.П.* Інформаційна технологія проектних досліджень складних технічних об'єктів // Наук. вісті НТУУ «КПИ». – 2000. – № 4. – С. 32–42.
5. *Зинченко В.П.* Исследование и реализация алгоритма адаптивного управления экспериментом // Проблемы управления и информатики. – 2001. – № 3. – С. 58–69.
6. *Зинченко В.П., Горин Ф.М., Муха І.П., Зинченко Н. П.* MathCad як засіб дослідження взаємодії зовнішнього середовища на технічний об'єкт // Теорія оптимальних рішень. – К.: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2000. – С. 151–160.
7. *Зинченко В.П.* Показатели качества программного обеспечения // Интеллектуальные информационно-аналитические системы и комплексы. – К.: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, 2000. – С. 142–161.
8. *Зинченко В.П.* Методологія проектування первинних джерел інформації // Наук. вісті НТУУ «КПИ». – 2001. – № 5. – С. 69–72.
9. *Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И.* Вычислительные методы. В 2 т. – М.: Наука. – Т. 1. 1976. – 304 с.; Т. 2, 1977. – 400 с.

Стаття надійшла до редакції 31.10.01.

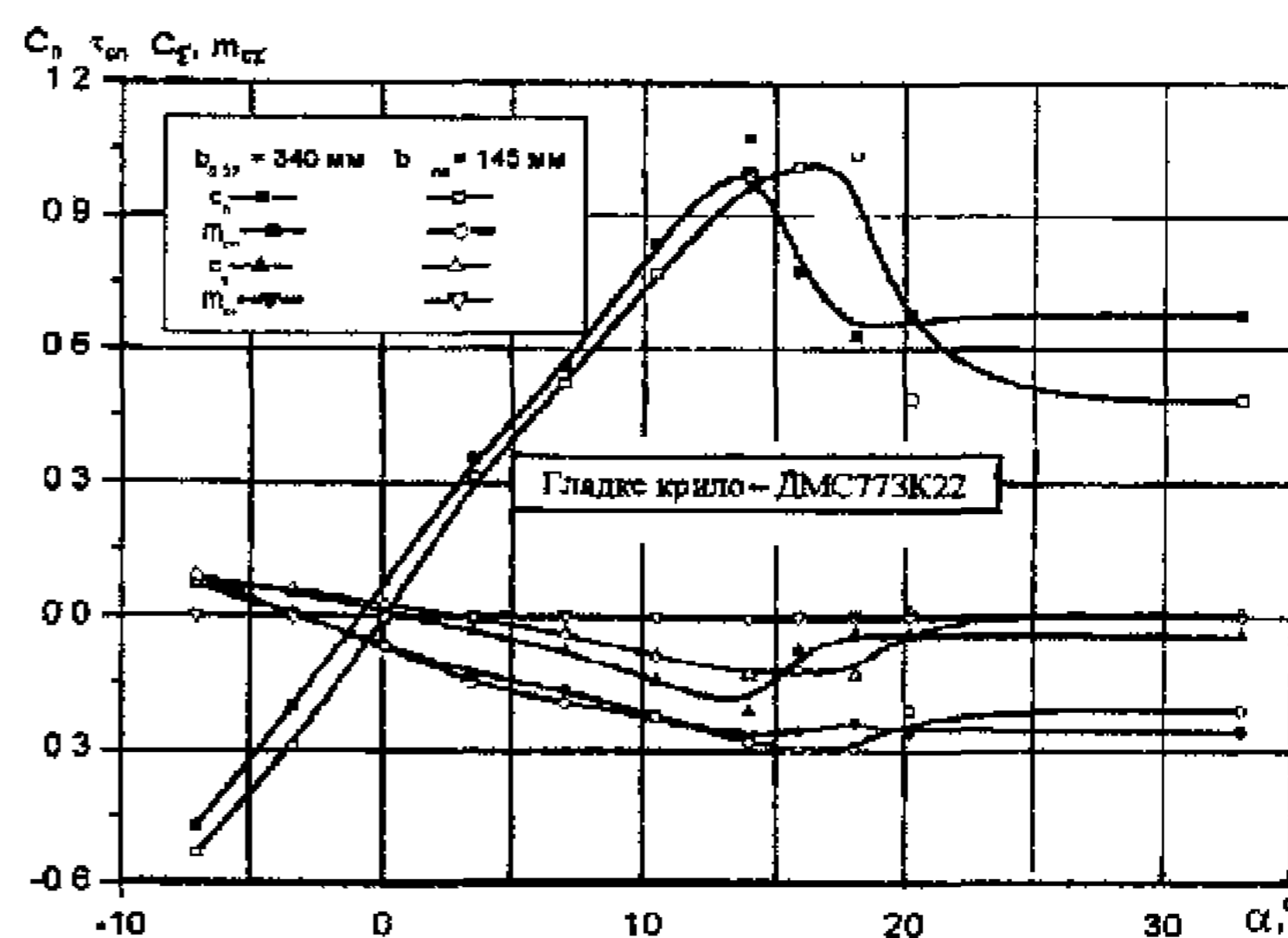


Рис. 9