

Розроблена машина також пройшла випробування на відтворюваність результатів. Для цього використовували контрзразки і нерухомі зразки однієї партії поставки, однакові умови тертя (шлях тертя, прискорення навантаження і швидкості, початкова шорсткість поверхонь та ін.) в одному середовищі – моторне масло М-8ВВ. Розбіжність в отриманих експериментальних даних за величиною зносу становила 1–3%, що для випробувальних машин тертя є дуже високим показником коректності як машини, так і методики випробувань.

Список літератури

1. Поляков А.А. К вопросу о лабораторных испытаниях материалов узлов трения // Трение и износ. – 1990. – Т.11, №4. – С. 668–675.
2. Матвеевский Р.М. По поводу статьи А.А. Полякова "К вопросу о лабораторных испытаниях материалов узлов трения" // Трение и износ. – 1991. – Т.12, №5. – С. 712–719.

Стаття надійшла до редакції 21.11.02.

050p-48

УДК 629.736.072.8; 681.3

тренажер авіаційний
стенд динамічний тренажера
характеристика стенда

В.В. Кабанячий, старш. наук. співроб.
(Національний авіаційний університет)

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМІЧНИХ СТЕНДІВ

Наведено математичну постановку, розв'язання задачі ідентифікації й визначено характеристики динамічних стендів авіаційних тренажерів.

Якість керування динамічним стендом (ДС), синтезованим для імітації акселераційних дій на авіаційних тренажерах, значною мірою визначається ступінню адекватності математичної моделі (ММ). Найточнішим методом визначення характеристики ДС є ідентифікація [1–5].

Постановка завдання. У дискретні часи

$$t_1 = 0, t_2, \dots, t_N = T_c$$

спостереження вхідної й вихідної векторних змінних величин ДС

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\};$$

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$$

зв'язані оператором ДС

$$Y_i = A_{dc}(X_i), i = \overline{1, N},$$

де t_1, t_2, \dots, t_N – дискретні часи; N – кількість спостережень; T_c – тривалість інтервалу спостережень; X, Y – відповідно вхідна й вихідна векторні змінні величини ДС; $x_1, x_2, \dots, x_N, y_1, y_2, \dots, y_N$ – відповідно спостереження вхідної й вихідної векторних змінних величин ДС у часи $\{t_i, i = \overline{1, N}\}$; A_{dc} – оператор ДС.

Аналогічно ММ описується операторним рівнянням $Y_m = A_m(X_m)$, де Y_m, X_m – відповідно вхідна й вихідна векторні змінні величини ММ; A_m – оператор ММ.

Синтез оператора ММ і є метою ідентифікації. Складність ДС як об'єкта досліджень не дозволяє побудувати повністю ізоморфну ММ. Основою побудови ММ є спрощення й абстракція оператора ДС і відображення у зручній формі його суттєвих аспектів. Така модель є точною, однозначною відповідно до реального ДС, але являє собою наближене відображення, апроксимацію, ідеалізацію ДС і не поводить як само, як він. Необхідна точність, яка забезпечує розповсюдження результатів математичного моделювання на реальний ДС, досягається дотриманням подібності, тобто між операторами ДС і ММ існує не еквівалентність, а адекватність (подібність).

Адекватність розуміється як критерій помилки або функції втрат, що оцінює близькість операторів ДС і ММ і встановлює штраф при неправильному визначенні оператора ММ. Сту-

піль близькості операторів ДС та ММ безпосередньо оцінити не можна. Але з ними функціонально пов'язані вихідні векторні змінні величини ДС і ММ. Тому як критерій адекватності використовують функціонал від вихідних векторних змінних величин ДС та ММ

$$Q(A_m) = Q[Y, Y_m(A_m)],$$

де Q – критерій адекватності ММ досліджуваному ДС, що оцінює помилку збігу вихідних векторних змінних величин ДС та ММ:

$$e(t) = Y(t) - Y_m(t)$$

(зміни в часі дійсної та розрахованої реакції ДС і ММ на одне й те саме керуюче діяння).

Ідентифікація полягає в побудові такої ММ, реакція якої $Y_m = A_m(U)$, де U – керуюче діяння, близька до реакції ДС на те саме керуюче діяння $Y = A(U)$ і зводиться до задачі мінімізації

$$Q(A_m) \rightarrow \min \Rightarrow A_m^*, \\ A_m \in \Omega_A,$$

де A_m^* – оператор адекватної ММ досліджуваного ДС; Ω_A – клас операторів ММ.

Оскільки ММ містить інформацію про структуру й значення параметрів ДС

$$A_m = A_m(D, C),$$

де D – вектор структурних параметрів ММ; C – вектор параметрів ММ, ідентифікація має три етапи:

- вибір критерію адекватності ММ досліджуваному ДС;
- визначення структури оператора адекватної ММ (структурна ідентифікація);
- визначення значень параметрів, оптимальних із погляду обраного критерію адекватності (параметрична ідентифікація).

Вибір критерію адекватності. Уся інформація про оператор ДС міститься у його вихідній векторній змінній величині, а провідником цієї інформації є вхідна векторна змінна величина (керуюче діяння). Отже, критерій адекватності залежить не тільки від операторів ДС і ММ, але й від керуючого діяння

$$Q(U) = Q[A(U), A_m].$$

Не кожне керуюче діяння дозволяє з достатньою точністю будувати ММ: добре керуюче діяння підсилює ідентифікованість параметрів, погане – послаблює. Оптимальне керуюче діяння, що максимізує ідентифікованість параметрів ММ та забезпечує достатній обсяг апостеріорної інформації в досліджуваному частотному діапазоні з потрібною повнотою й достовірністю та за мінімальний час. Вибір оптимального керуючого діяння являє собою складну задачу. З одного боку, воно залежить від точності значень параметрів і структури ММ і в міру уточнення ММ його потрібно корегувати. З другого боку, оптимальне керуюче діяння пов'язано з частотним діапазоном, який повинна відображати ММ. На першому етапі, коли ні структура адекватної ММ, ні значення її параметрів невідомі, для побудови ММ доцільно використовувати керуюче діяння

$$U = 0,5A_u [1 - \cos(2\pi f_u t)],$$

де A_u – амплітуда керуючої дії, значення якої визначається прийнятим робочим діапазоном переміщень платформи ДС; $f_u = 1/T_u$ – частота керуючого сигналу; T_u – тривалість керуючого сигналу; t – поточний час.

Оскільки ідентифікація являє собою оптимізацію не самого оператора ММ, а тільки критерію адекватності, то близькість операторів ДС і ММ пов'язана з критерієм адекватності й говорити про адекватність можна лише у сенсі цього критерію. Критерій адекватності згідно з поставленою задачею повинен відповідати на питання про ступінь адекватності ММ досліджуваному ДС. Крім цього, деяке значення критерію Q^* свідчить про достатню близькість оператора ММ оператору ДС $A_m^* \approx A$.

Через неминучу наявність шумів у записах вихідної векторної змінної величини ДС критерій адекватності залежить не тільки від операторів ММ і ДС, але й шумів. Адекватність ММ слід оцінювати за різницею вихідної векторної змінної величини ММ та складової вихідної векторної змінної величини ДС, що залежить від керуючого діяння. Для успішнішої ідентифікації потрібно заглушувати шуми експериментальних даних і використовувати у критерії адекватності процедури, які зменшують вплив шумів.

Стимулами сприйманих пілотом акселераційних діянь є кутові прискорення та градієнти лінійних прискорень. Тому для ідентифікації ДС найефективнішим виявився функціонал

$$Q = \int_0^{T_u} [\ddot{s}_{\text{ДС}}(t) - \ddot{s}_{\text{ММ}}(t)]^2 h_f(t) dt,$$

де $\ddot{s}_{\text{ДС}}$, $\ddot{s}_{\text{ММ}}$ – відповідно прискорення ДС та ММ; h_f – вагова функція.

Цей критерій має такі достоїнства:

- відображає ступінь близькості реакцій ДС і ММ;
- здійснюючи усереднення за часом, пригнічує шуми експериментальних даних;
- має ясний фізичний сенс – дисперсію вихідної векторної змінної величини ММ відносно вихідної векторної змінної величини ДС;
- не використовує ніяких інших припущень про випадкові збурення, крім припущення про існування скінченної дисперсії;
- за наявності гауссових шумів дає найкраще наближення оператора адекватної ММ;
- добре оцінює великі та тривалі помилки, а малі й короткочасні слабо відбиваються на його значенні;
- забезпечує добру форму критерію адекватності;
- зручний для мінімізації.

Коректний вибір вагової функції $h_f(t) > 0$ з відповідним нормуванням

$$\int_0^{T_u} h_f(t) dt = \text{const}$$

дозволяє врахувати значущість експериментальної інформації в різні часи (значущість опису максимальної амплітуди прискорення й градієнтів прискорення на етапах розгону та гальмування ДС) і побудувати адекватну ММ, що відображає найважливіші аспекти реального ДС.

Структурна ідентифікація. Вибір структури адекватної ММ, що називається структурною ідентифікацією або ідентифікацією у широкому розумінні, є невід'ємним етапом ідентифікації. Структурна ідентифікація полягає у визначенні структурних параметрів

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\},$$

де d_1, d_2, \dots, d_k – структурні параметри ММ; k – кількість структурних параметрів ММ.

Теоретичною основою розв'язання задачі структурної ідентифікації є закон Парето [6]. Він стверджує, що через неоднакову інформативність у можливій множині структурних параметрів існує життєво важлива меншість та тривіальна більшість. Надто проста ММ, в яку не включені всі структурні параметри, що належать життєво важливій меншості, при будь-яких значеннях параметрів не буде адекватна ДС. Однак, поки не зачеплена життєво важлива меншість, нічого суттєвого з ММ не відбувається. Але наявність надлишкової кількості структурних параметрів, ускладнюючи структуру ММ, ускладнює її розуміння, аналіз та використання, знижує достовірність структурної ідентифікації. Ступінь розуміння ММ, як правило, зворотно пропорційний кількості параметрів, що фігурують у її описі, і запровадження надлишкової кількості параметрів, які мають найдрібніші особливості й нічого не додають в її розумінні оператором ДС, може привести до того, що дійсно важливі аспекти та функціональні зв'язки загубляться в масі тривіальних і ідентифікація характеристик ДС виявиться безуспішною [6–10].

Зв'язок між вектором структурних параметрів і здатністю ММ відповідати конкретному набору експериментальних даних відображається через критерій адекватності. Відповідно до теореми скінченного передбачення Ейкейка [9] існує оптимальний вектор структурних параметрів, який має структуру оператора адекватної ММ, а сама структурна ідентифікація зводиться до задачі мінімізації:

$$Q(D) \rightarrow \min \Rightarrow D^*;$$

$$D \in \Omega_D,$$

де D^* – оптимальний вектор структурних параметрів, що описує структуру оператора адекватної ММ; Ω_D – область визначення структурних параметрів ММ.

Отже, структурна ідентифікація являє собою задачу наближення і складається з формування області визначення структурних параметрів та знаходження оптимального вектора структурних параметрів, що описують структуру оператора адекватної ММ шляхом порівняння результатів реалізації гіпотез конкуруючих ММ з експериментальними даними.

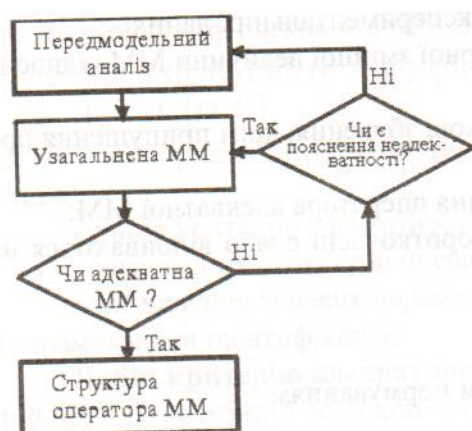


Рис. 1. Схема фізико-математичного варіанта структурної ідентифікації

ДС узагальнена ММ повинна включати гіпотези ММ з надлишковою кількістю структурних параметрів. Для уникнення зведення структурної ідентифікації до задачі підгонки потрібно включати в узагальнену ММ гіпотези зі скороченим (до найвірогідніших) набором структурних параметрів.

Другий етап ідентифікації полягає в обґрунтованому виборі структури оператора адекватної ММ, яка найкраще описує ДС. Для цього розглядається внутрішня обґрунтованість кожної конкуруючої ММ та ступінь її відповідності оператору ДС. З погляду успішного визначення структури оператора адекватної ММ, що не була б тривіальною через надмірні спрощення чи громіздкою через перевантаження несуттєвими деталями, перевірку починають із найпростішої структури, тобто ММ, яка містить найінформативніші структурні параметри. Далі переходять до оцінки усе більш і більш складних структур. Для цього, використовуючи область визначення структурних параметрів ММ, додаванням або вилученням структурних параметрів домагаються поліпшення ступеня адекватності. Цілеспрямованість процесу структурної ідентифікації забезпечується переходом до перевірки кожної наступної гіпотези конкуруючої ММ тільки після ретельного аналізу попередньої. Математична модель, що не погоджується з експериментальними даними, не повинна відхилитися до появи кращої ММ. Для впевненості, що ММ адекватна ДС, структура ММ, яка дає абсурдні результати, повинна братися під підозру. Такий підхід дозволяє виявити структурні параметри, необхідні для підвищення ступеня адекватності ММ і невраховані в оцінюваній гіпотезі ММ, та вибрати для наступної перевірки гіпотезу структурної ММ, яка забезпечує більшу ступінь адекватності. Структура ММ удосконалюється доти, доки остаточно не стане адекватною ДС.

Коректно розв'язати задачу структурної ідентифікації дозволяє фізико-математичний підхід (рис. 1), що містить як цілком обґрунтовані теоретичні принципи, так і деякі евристичні елементи. Фізико-математичний підхід дозволяє будувати ММ, які за формальними критеріями дещо гірші ММ, отриманих при математичному підході (підгонкою кривих), але фізичніші включають лише дійсно важливі параметри, інваріантні до зміни вихідних даних.

Фізико-математичний варіант структурної ідентифікації складається з двох етапів.

Творення є першим етапом ідентифікації, який містить передмодельний аналіз, формування області визначення структурних параметрів та побудову узагальненої ММ, що являє собою набір гіпотез конкуруючих ММ. З метою підвищення вірогідності опису головних аспектів

Узагальнену ММ описують диференціальними рівняннями другого, третього і четвертого порядку з нелінійними коефіцієнтами. Як останні використовувався обмежений ряд можливих комбінацій членів рівняння. Так, ММ, що описувалася нелінійним диференціальним рівнянням четвертого порядку, має вигляд:

$$\begin{aligned} \overset{\dots}{s}_m = & d_1 (s_m - d_2 U) + d_3 \overset{\dots}{s}_m + d_4 \overset{\dots}{s}_m + d_5 \overset{\dots}{s}_m + d_6 \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_7 \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_8 \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + \\ & + d_9 \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{10} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{11} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{12} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{13} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + \\ & + d_{14} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{15} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{16} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{17} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{18} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{19} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + \\ & + d_{20} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{21} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{22} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{23} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m, \end{aligned}$$

де $\overset{\dots}{s}_m$, $\overset{\dots}{s}_m$, $\overset{\dots}{s}_m$, $\overset{\dots}{s}_m$, $\overset{\dots}{s}_m$ – відповідно переміщення, швидкість, прискорення, градієнт прискорення та четверта похідна переміщення ММ за часом.

Порядок деяких параметрів ММ апіорі невідомий. Це призводить до того, що абсолютні прирости шуканих параметрів відповідають різним відносним приростам. Підвищена чутливість одних параметрів та надзвичайно низька інших зменшують ефективність ідентифікації за налаштованою ММ. Масштабування шуканих параметрів

$$c_{mi} = c_i / k_{mi}, \quad i = \overline{1, n};$$

$$k_{mi} = c_{0i}, \quad i = \overline{1, n},$$

де c_{mi} – масштабоване значення i -го параметра; c_i – значення i -го параметра; k_{mi} – коефіцієнт масштабування i -го параметра відносно апіорних значень; n – кількість параметрів ММ; c_{0i} – апіорне значення i -го параметра, вирівнюючи чутливість параметрів, поліпшує процедуру ідентифікації характеристик ДС.

На етапі перевірки було встановлено, що за формальними ознаками найліпше відображає реакцію ДС структура ММ, описана диференціальним рівнянням четвертого порядку з нелінійними коефіцієнтами (рис. 2, а):

$$\begin{aligned} \overset{\dots}{s}_m = & d_1 (s_m - d_2 U) + d_3 \overset{\dots}{s}_m + d_4 \overset{\dots}{s}_m + d_5 \overset{\dots}{s}_m + d_6 \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_7 \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + \\ & + d_8 \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_9 \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{10} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{11} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{12} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + \\ & + d_{13} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{14} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{15} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{16} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{17} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{18} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{19} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m + d_{20} \overset{\dots}{s}_m \overset{\dots}{s}_m. \end{aligned}$$

Вона відображає високочастотні складові руху, які для імітації низькочастотних акселераційних діянь не лише не суттєві, але зайві й шкідливі, яких намагаються позбутися і врахування яких ускладнює розрахунки, не поліпшуючи якість імітації низькочастотних акселераційних діянь на авіаційних тренажерах. Тому адекватною ММ для синтезу керування під час імітації низькочастотних акселераційних діянь на авіаційних тренажерах є ММ, описана диференціальним рівнянням другого порядку (рис. 2, б):

$$\overset{\dots}{s}_m = a_0 \cdot U - b_0 \cdot \overset{\dots}{s}_m - b_1 \cdot \overset{\dots}{s}_m,$$

де a_0 , b_0 , b_1 – коефіцієнти ММ.

Параметрична ідентифікація. Одним із порівняно простих і в той же час гнучких та універсальних методів ідентифікації є метод деформованого багатогранника [11; 12]. Він відноситься до неявних пошукових ітераційних методів ідентифікації за налаштованою ММ, процедура яких полягає в подачі на ММ керуючого діяння і за цим діянням та величиною й видом вихідних векторних змінних величин ДС і ММ зміні параметрів ММ так, щоб параметри ММ були б близькими до параметрів ДС.

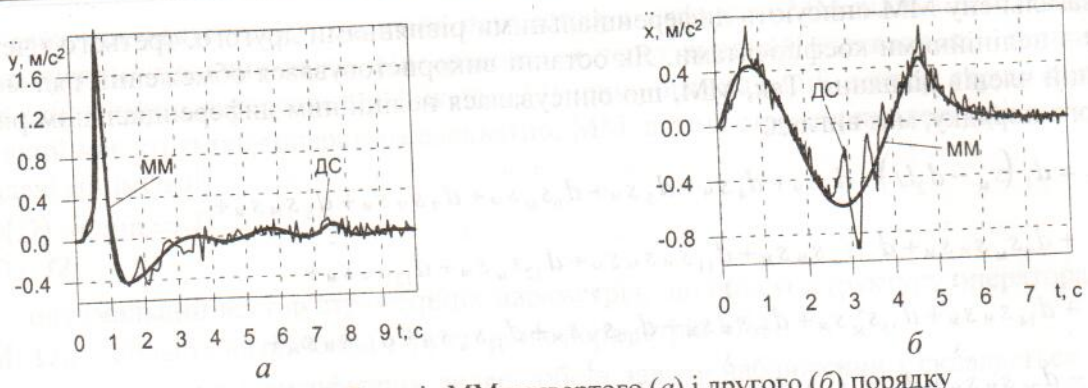


Рис. 2. Реакція ММ четвертого (а) і другого (б) порядку

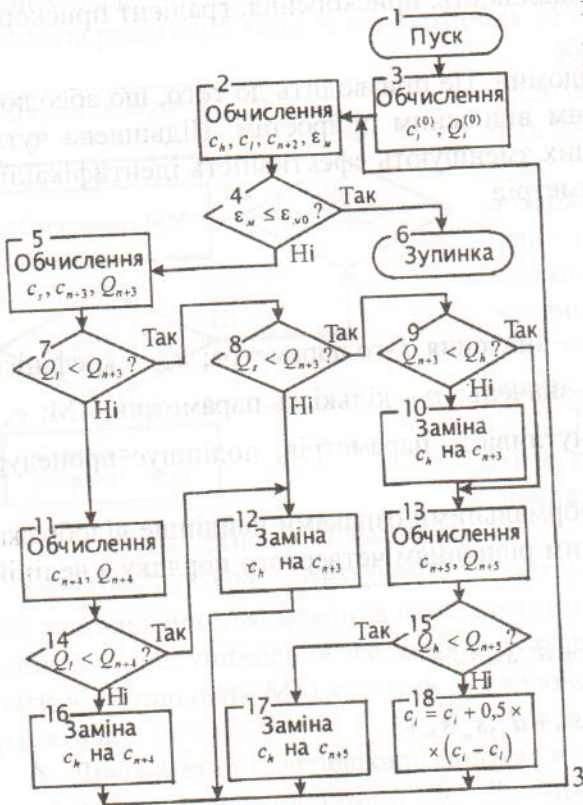


Рис. 3. Блок-схема метода деформованого багатогранника

Метод деформованого багатогранника полягає у наступному (рис. 3). В евклідовому просторі розв'язків E^n будується регулярний симплекс (операція 2), вершини якого є векторами шуканих параметрів $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, де c_1, c_2, \dots, c_n – параметри ММ; n – кількість параметрів ММ.

Координати вершин початкового багатогранника визначаються допоміжною $[n \times (n+1)]$ – вимірною матрицею:

$$A_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_3 & a_3 \\ a_1 & a_3 & a_2 & \dots & a_3 & a_3 \\ a_1 & a_3 & a_3 & \dots & a_2 & a_3 \\ a_1 & a_3 & a_3 & \dots & a_3 & a_2 \end{vmatrix},$$

$$a_1 = -\frac{t_n}{\sqrt{2(n+1)}}; \quad a_2 = \frac{t_n [1 + (n-1)\sqrt{(n+1)}]}{n\sqrt{2(n+1)}},$$

$$a_3 = \frac{t_n (1 - \sqrt{(n+1)})}{n\sqrt{2(n+1)}},$$

де A_n – допоміжна матриця; t_n – відстань між вершинами, що дорівнює 1/5 припустимого діапазону зміни шуканих параметрів із допомогою співвідношення

$$c_j = c_0 + A_j, \quad j = \overline{1, n+1},$$

де c_j – j -а вершина багатогранника; c_0 – базова точка, за яку береться вектор апріорних значень шуканих параметрів; A_j – вектор-стовпець, складовими якого є елементи j -го стовпця матриці A_n .

У вершинах багатогранника $\{c_j, j = \overline{1, n+1}\}$ розраховуються значення критерію адекватності $\{Q_j, j = \overline{1, n+1}\}$. На кожній ітерації визначаються вершини багатогранника, що дають максимальне та мінімальне значення критерію адекватності, центр тяжіння багатогранника й критерій закінчення пошуку (операція 3):

$$Q_h = Q(c_h) = \max\{Q(c_j), j = \overline{1, n+1}\};$$

$$Q_l = Q(c_l) = \min\{Q(c_j), j = \overline{1, n+1}\};$$

$$c_{n+2} = \frac{1}{n} \left[\left(\sum_{j=1}^n c_j \right) - c_h \right];$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} (c_j - c_{n+2})^2,$$

де Q_h , Q_l – відповідно максимальне й мінімальне значення критерію адекватності; c_h , c_l – відповідно вершини багатогранника, що відповідають максимальному та мініимальному значенням критерію адекватності; c_{n+2} – центр тяжіння усіх вершин багатогранника; ε_m – критерій закінчення пошуку.

Перевіряється умова припинення пошуку (операція 4): $\varepsilon_m \leq \varepsilon_{mo}$?, де $\varepsilon_{mo} = 10^{-5} \dots 10^{-6}$. Якщо ця умова виконується, пошук припиняється (операція 6). В іншому випадку визначається вершина багатогранника, яка дає друге за величиною значення критерію адекватності (операція 5):

$$Q_s = Q(c_s) = \min \{ Q(c_i) \mid c_i \neq c_h \}, j = \overline{1, n+1},$$

де Q_s – друге за величиною значення критерію адекватності; c_s – вершина багатогранника, що відповідає другому за величиною значенню критерію адекватності.

Вершина багатогранника, яка відповідає максимальному значенню критерію адекватності, замінюється на ліпшу, отриману відображенням (операція 5):

$$c_{n+3} = c_{n+2} + k_\alpha (c_{n+3} - c_h),$$

розтягом (операція 11):

$$c_{n+4} = c_{n+2} + k_\gamma (c_{n+3} - c_{n+2}),$$

стисканням (операція 13):

$$c_{n+5} = c_{n+2} + k_\beta (c_h - c_{n+2})$$

або редукцією (операція 18):

$$c_j = c_j + 0,5 (c_j - c_l), j = \overline{1, n+1},$$

де c_{n+3} – вершина багатогранника, отримана в результаті операції відображення; k_α – коефіцієнт відображення ($k_\alpha = 1$); c_{n+4} – вершина багатогранника, отримана в результаті операції розтягу; k_γ – коефіцієнт розтягу ($k_\gamma = 2$); c_{n+5} – вершина багатогранника, отримана в результаті операції стискання; k_β – коефіцієнт стискання ($k_\beta = 0,5$).

На кожній ітерації метод деформованого багатогранника знаходить вектор параметрів, який дає менше, ніж на попередній ітерації значення критерію адекватності. Послідовність цих векторів збігається до вектора параметрів, який розв'язує задачу ідентифікації:

$$A_m^* = A_m(C^*),$$

де C^* – вектор параметрів адекватної ММ.

Алгоритм ідентифікації методом деформованого багатогранника має такі достоїнства:

- можливість визначення різних параметрів ММ, у тому числі нелінійні та взаємозв'язані;
- інваріантність до варіації та неоднорідностей даних випробувань, обумовлену відсутністю нестійких в обчислювальному відношенні процедур;
- повне використання апріорної інформації, що підвищує надійність результатів ідентифікації й забезпечує за рахунок удалого вибору базової точки та відстані між вершинами багатогранника визначення вектора параметрів адекватної ММ за прийнятну кількість ітерацій;
- добра адаптація до топографії критерію адекватності, яка забезпечується деформованістю багатогранника і складається з його витягування вздовж довгих похилих площин, стиснення в околах мінімуму та зміні напрямку пошуку у викривлених западинах;

– простота вилучення локальних мінімумів і можливість отримання суттєвого обсягу інформації про критерій адекватності, що гарантується охопленням великої області простору розв'язків на початку пошуку;

– прискорення пошуку поблизу області глобального мінімуму, коли траєкторія пошуку мало відрізняється від траєкторії метода найшвидшого спуску;

– можливість отримання наближеного розв'язку як результату проміжних обчислень;

– слабка залежність точності результатів ідентифікації від якості окремих елементів, що забезпечується корегуючими властивостями зворотного зв'язку;

– мінімальний обсяг підготовки експериментальних даних.

Ідентифіковані характеристики ДС авіаційних тренажерів наведено в таблиці.

Характеристики ДС

Тренажер	Коефіцієнт моделі	Степінь вільності					θ
		x	y	z	γ	ψ	
Ту-154	a_0	—	0,4306	—	7,49	—	12,40
	b_1	—	8,44	—	5,33	—	4,83
	b_0	—	25,63	—	9,6	—	14,09
Ту-154М	a_0	—	0,3574	—	6,22	—	9,58
	b_1	—	4,80	—	5,81	—	4,9
	b_0	—	21,53	—	8,18	—	12,28
Іл-76Т	a_0	—	0,2805	—	4,83	—	11,47
	b_1	—	3,70	—	4,5	—	3,90
	b_0	—	17,53	—	6,19	—	13,49
Ан-124	a_0	—	0,1418	—	11,43	—	14,57
	b_1	—	3,40	—	6,53	—	6,30
	b_0	—	9,45	—	15,45	—	17,99
Іл-62М	a_0	8,38	6,16	7,12	311,78	314,16	324,99
	b_1	19,61	20,64	41,7	18,41	15,65	10,82
	b_0	50,17	40,23	42,38	50,86	51,00	51,26
Іл-86НП	a_0	7,84	3,51	5,08	289,53	261,07	243,59
	b_1	39,14	20,17	28,48	42,16	25,94	37,53
	b_0	39,02	17,27	23,75	40,55	41,44	40,94
Ан-74ТК-200	a_0	41,52	49,46	41,96	44,92	44,23	—
	b_1	10,17	12,15	11,05	14,24	15,24	—
	b_0	41,52	49,46	41,96	44,92	44,23	—

Використання динамічних стендів для синтезу керування під час імітації низькочастотних акселераційних діянь на комплексних тренажерах літаків дозволило суттєво наблизити імітовані акселераційні діяння до реальних і підвищити якість навчання.

Список літератури

1. Городецький В.И., Юсупов Р.М. Метод последовательной оптимизации в задачах идентификации // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1972. – № 3. – С. 72–79.
2. Грон Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
3. Костюк В.И. Адаптивные системы идентификации. – К.: Техніка, 1975. – 288 с.
4. Растринин Л.А., Маджаров Н.Е. Введение в идентификацию объектов управления. – М.: Энергия, 1977. – 215 с.

5. Салыга В.И. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Идентификация и оптимизация управления. – Харьков: Вышш. шк., 1976. – 180 с.
6. Шенон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
7. Gupta N.K., Hall W.E., Trankle T.L. Advanced Methods of Model Structure Determination from Test Data// Proceedings of Atmos. Flight Mech. Conf. – Hollywood, Florida, 1977. – P. 386–400.
8. Hall W.E., Gupta N.K., Tyler J.S. Model Structure Determination and Parameter Identification for Nonlinear Aerodynamic Flight Regimes – AGARD-CP-172. – 1975. – P. 21/1–21/21.
9. Klein V. On the Adequate Model for Aircraft Parameter Estimation – Cranfield Institute of Technology / Cranfield Report NAERO 28. – 1975. – 29 p.
10. Schwanz R. C., Wells W. R. Identification of Aerolastic Parameter Using a Recursive Sequential Least Squares Method// AIAA Atmos. Flight Mech. Conf. – Danvers, Mass, New York. – 1980. – P. 651–661.
11. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 682 с.
12. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

Стаття надійшла до редакції 16.10.02.

K413.166

УДК 621.891

трение жидкостное
поверхность контактная металла
материал смазочный
слой поверхностный металла

Р.Г. Мнацканов, д-р техн. наук, проф.

(Національний авіаційний університет)

В.О. Довбуш, асп.

(Національний авіаційний університет)

О.Є. Якобчук, асп.

(Національний авіаційний університет)

ЗМІНА СТРУКТУРИ І СКЛАДУ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ

Розглянуто результати досліджень особливостей структурного стану тонких поверхневих шарів металу при динамічному навантаженні під час граничного змащення з застосуванням звичайних і хімічно модифікованих мастильних матеріалів. Наведено умови формування оптимального структурного складу, що визначає підвищення зносостійкості і вплив мастильного середовища на досліджуваний процес.

Вступ. Механізм взаємодії контактних поверхонь у мастильному середовищі під час граничного змащення визначається комплексом механо-фізико-хімічних процесів, що протікають на них і залежать від складу й властивостей мастильного середовища. У разі тертя сталі за наявності вуглеводнів у зоні тертя утворюються смолоутворюючі відкладення й окисли заліза, що вказує на протікання у процесі тертя хімічних реакцій, в яких беруть участь вуглеводні, кисень, присадки і метал [1].

Мастильна дія з фізичного погляду виявляється в утворенні граничних шарів на контактних поверхнях. При помірних навантажувально-швидкісних режимах властивості граничних шарів багато в чому визначає мастильна дія масла. У механізмі контактної взаємодії роль граничних шарів має неоднозначний характер, що пов'язано з впливом поверхнево-активних речовин (ПАР), що визначають рівень поверхневої енергії в місцях фактичного контакту металів. Граничні мастильні шари, що формуються на контактних поверхнях, значною мірою змінюють властивості поверхневих шарів металу.

Мастильна дія масел із позиції хімії контакту виявляється в утворенні на поверхнях тертя і під поверхневих шарах нових хімічних сполук у вигляді твердих плівок. Особливості хімічних реакцій, кінетика утворення плівки і її руйнування ще знаходяться в стадії вивчення. Очевидно, що у визначенні характеристик присадок, крім властивостей мастильного матеріалу, необхідно враховувати властивості тонкого поверхневого шару [2].

Основний розділ. Для виявлення особливостей структурного стану тонких поверхневих шарів металу, зумовленого дією різних типів мастильних матеріалів, досліджували зразки зі