УДК 629.735.083.06

Воробйов В. М. д-р техн. наук
Єнчев С. В.

МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ БОРТОВИХ СИСТЕМ АВІОНІКИ В ЗАДАЧАХ СЕРТИФІКАЦІЇ НА РАННІЙ СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

Аерокосмічний інститут Національного авіаційного університету

В статті розглянуто найбільш практичний метод ідентифікації – метод найменших квадратів, як спосіб ідентифікації моделі системи на ранній стадії проектування. Запропоновано модифікацію методу за допомогою вагових коефіцієнтів. Розглянуто методологічні аспекти функціонування моделюючого комплексу в рамках концепції «Сертифікація бортових систем авіоніки на землі». Наведена структурна схема комплексу та алгоритм його роботи.

Постановка проблеми

В процесі створення об'єктів нової техніки гостро стоїть проблема сертифікації виробу. Особливо це помітно при проектуванні складних динамічних систем, до яких відносяться системи та комплекси бортового обладнання повітряного судна (ПС). Так як різні системи авіоніки часто створюються різними фірмами-виробниками, це вносить додаткову складність для узгодженої роботи комплексу. Тому необхідна розробка системи методів і методик для досконалої ідентифікації параметрів створюваних систем.

Аналіз досліджень і публікацій

В літературі [1] розглянуті методи оцінки збіжності теоретичних досліджень і моделювання систем управління авіаційних газотурбінних двигунів з натурним експериментом, а також результати досліджень із застосуванням спеціалізованих моделей різного ступеню наближення і прямих методів ідентифікації експериментальних характеристик двигунів і елементів автоматики при наявності корисної інформації. Найбільш практичному методу ідентифікації параметрів систем, методу найменших квадратів, присвячені роботи [2, 3, 4, 5, 6].

Постановка задачі

Безпосередньою задачею дослідження є методологічне обґрунтування методу сертифікації бортових систем «на землі» з використанням обчислювальних потужностей сучасних електронно-обчислювальних машин (ЕОМ), а також модифікація методу найменших квадратів для задач ідентифікації системи.

Метод найменших квадратів в задачах ідентифікації моделі

При сертифікації виробів на ранній стадії проектування гостро стоїть проблема ідентифікації системи та моделі системи по результатам натурного експерименту. Найбільш практичне значення серед методів ідентифікації моделі реальній системі здобув метод найменших квадратів [1]: Оцінка наближення моделі реальному процесу по цьому методу в класичній формі проводиться по виразу:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{m=1}^{n}\left(\bar{x}_m - \hat{\bar{x}}_m\right)^2},$$

де $\bar{x}_m = \dfrac{x_m}{x_{om}}$, $\hat{\bar{x}}_m = \dfrac{\hat{x}_m}{x_{om}}$ відносні значення вихідних параметрів x_m і $\hat{x}_m$ моделі та реального процесу (виміряного в результаті фізичного (натурного) або напівнатурного експерименту); n – число врахованих вихідних параметрів системи; x_{om} – базисне (середнє) значення параметру x_m.

Оцінка ступеню наближення (ідентифікація) моделі реальному процесу (результатам експерименту) по виразу (1) має суттєвий недолік – при реалізації такого методу не враховується ступінь впливу на якість моделі окремих, можливо, особливо важливих параметрів. Для усунення цього недоліку пропонується використовувати модифікацію методу найменших квадратів:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{m=1}^{n} C_m \left(\bar{x}_m - \hat{\bar{x}}_m\right)^2},$$

де C_m - ваговий коефіцієнт m-вого параметра, який враховує „важливість" даного збурення на діючий процес.

При цьому необхідно забезпечити адекватність оцінок за допомогою виразів (1) і (2), тобто провести нормалізацію коефіцієнтів C_m, щоб можна було порівнювати оцінки ідентифікації моделі процесу які проводяться за допомогою виразів (1) і (2). В якості фактора нормалізації пропонується забезпечити виродження виразу (2) у вираз (1) при рівності всіх коефіцієнтів C_m, тобто

$$\sum_{m=1}^{n} C_m = 1 \qquad (3)$$

Таким чином якщо всі вагові коефіцієнти у виразі (2) однакові, то $C_m = C = \frac{1}{n}$, тобто вираз (2) вироджується у вираз (1). Таким чином вираз (2) нормалізовано до виразу (1).

Вибір коефіцієнтів C_m проводиться при розгляді конкретного процесу. Коли мова йде про створювані системи і моделі, вагові коефіцієнти виразу (2) можна отримати при поетапній ідентифікації об'єкту. Перший етап заключається в ідентифікації моделі системи при цьому приймають вагові коефіцієнти C_m у виразі (2) рівними 1 або проводять ідентифікацію іншими методами (графічними, інтерполяційними, релаксаційними). На даному етапі роблять висновок про адекватність моделі системи результатам експерименту. На другому етапі проводять моделювання ідентифікованої моделі з ціллю визначення вагових коефіцієнтів.

Визначення вагових коефіцієнтів. Нехай задано математичну модель деякого процесу, при цьому відомо, що модель адекватна модельованому процесу. Наприклад, адекватність моделі підтверджена натурним експериментом з використанням інших методів ідентифікації. Дана модель в лінеаризованій матричній формі запису в перетвореннях Лапласа має вигляд:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1(p) \\ \bar{x}_2(p) \\ \dots \\ \bar{x}_n(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{W}_{11}(p) & \overline{W}_{12}(p) & \dots & \overline{W}_{1S}(p) \\ \overline{W}_{21}(p) & \overline{W}_{22}(p) & \dots & \overline{W}_{2S}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{W}_{n1}(p) & \overline{W}_{n2}(p) & \dots & \overline{W}_{ns}(p) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{z}_1(p) \\ \bar{z}_2(p) \\ \dots \\ \bar{z}_S(p) \end{pmatrix} \qquad (2)$$

$$\text{або } \overline{X}(p) = \overline{W}(p) \times \overline{Z}(p), \qquad (4)$$

де $\bar{x}_m(p)$ – відносне значення m-ого вихідного параметру моделі $\left(m = \overline{1,n}\right)$; $\overline{X}(p)$ – вектор-стовпчик відносних значень вихідних параметрів моделі розмірності n; $\bar{z}_k(p)$ – відносне значення k-го вхідного параметру моделі $\left(k = \overline{1,s}\right)$; $\overline{Z}(p)$ – вектор-стовпчик відносних значень вхідних параметрів моделі розмірності s; $\overline{W}_{ij}(p)$ – передаточна функція відносних значень i-го вихідного параметру до j-го вхідного параметру; $\overline{W}(p)$ – матриця передаточних функцій розмірності $n \times s$.

В установленому режимі вираз (4) прийме вигляд:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1(t) \\ \bar{x}_2(t) \\ \dots \\ \bar{x}_n(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{K}_{11} & \overline{K}_{12} & \dots & \overline{K}_{1S} \\ \overline{K}_{21} & \overline{K}_{22} & \dots & \overline{K}_{2S} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{K}_{n1} & \overline{K}_{n2} & \dots & \overline{K}_{ns} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{z}_1(t) \\ \bar{z}_2(t) \\ \dots \\ \bar{z}_S(t) \end{pmatrix}$$

$$\text{або } X(t) = K \times Z(t), \qquad (5)$$

де $\overline{K}$ – матриця відносних значень статичних коефіцієнтів підсилення розмірності $n \times s$.

Відповідно до виразу (5) можна записати:

$$\bar{x}_m(t) = \sum_{k=1}^{s} \overline{K}_{mk} \cdot \bar{z}_k(t), \text{ де } m = \overline{1,n}.$$

Таким чином m-ий вихідний параметр визначається через параметри моделі K_{mk} і вхідні змінні $z_k(t)$. Тобто взято самий загальний випадок лінеаризованої моделі, коли число входів не співпадає з числом виходів і не один із елементів матриці $\overline{K}$ не дорівнює нулю (модель з перехресними зв'язками).

Визначення вагових коефіцієнтів, з урахуванням фактору нормалізації (3), проводимо за рекурентним співвідношенням:

$$C_m = \frac{\sum\limits_{k=1}^{s} \overline{K}_{mk}}{\sum\limits_{m=1}^{n}\sum\limits_{k=1}^{s} \overline{K}_{mk}}. \tag{7}$$

Проводячи сумування всіх вагових коефіцієнтів виразу (7) по індексу m отримуємо:

$$\sum_{m=1}^{n} C_m = \sum_{m=1}^{n} \frac{\sum\limits_{k=1}^{s} \overline{K}_{mk}}{\sum\limits_{m=1}^{n}\sum\limits_{k=1}^{s} \overline{K}_{mk}} = \frac{\sum\limits_{m=1}^{n}\sum\limits_{k=1}^{s} \overline{K}_{mk}}{\sum\limits_{m=1}^{n}\sum\limits_{k=1}^{s} \overline{K}_{mk}} = 1. \tag{8}$$

Як видно з виразу (8) вираз (7) відповідає фактору нормалізації (3).

Дана модифікація методу найменших квадратів забезпечує ідентифікацію моделі в статичному (установленому) режимі. У випадку ідентифікації перехідних процесів моделі і реального процесу пропонується використовувати вираз (2) в інтегральній формі:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{m=1}^{n} \frac{C_m}{t_m} \int_{0}^{tm} \left[\overline{x}_m(t) - \hat{\overline{x}}_m(t)\right]^2 dt}, \tag{9}$$

де $(0, t_m)$ – час інтегрування різниці квадратів m-их вихідних характеристик моделі і процесу, при подачі на входи моделі та системи однакових вхідних збурень відповідно програми випробувань.

Нормалізація виразу (9) проводиться усередненням значення інтегралу за час інтегрування.

Методологічні аспекти функціонування моделюючого комплексу

Для забезпечення проведення сертифікаційних випробувань «на землі» необхідно забезпечити об'єкт сертифікації умовами роботи, ідентичними до виникаючих у польоті (очікувані та екстремальні умови експлуатації). Структура моделюючого комплексу представлена на рис. 1.

Представимо вихідні параметри системи (3) у вигляді вектора-стовпчика $\hat{X}$, який має розмірність n – числа врахованих факторів в польоті, а моделююча система зовнішніх збурень (4) реалізує програму випробувань у вигляді вектора-стовпця Z, подаючи необхідні збурення на об'єкт сертифікації. Паралельно ЕОМ (1) моделює роботу системи, при реалізації її математичної моделі у вигляді вектора-стовпця X, розмірності n. Тоді головною задачею моделюючого комплексу є встановлення відповідності об'єкта сертифікації вимогам нормативно-технічної документації, а також уточнення коефіцієнтів математичної моделі об'єкту, шляхом мінімізації виразу (9), який характеризує різницю вихідних параметрів моделі та системи X і $\hat{X}$.

У даній структурі пропонується реалізація програми наступному алгоритму:

1. У відповідності до програми випробовувань математична модель, що реалізується на ЕОМ (1) формує керуючі сигнали на об'єкт сертифікації (3) та моделюючу систему зовнішніх збурень (4).

2. Моделююча система зовнішніх збурень (4) реалізує програмні команди (11) через підсистеми що входять до її складу, наприклад, вібростенд, термобарокамеру, регулятор напруги та частоти живлення і т.д. Кількість підсистем моделюючого комплексу визначається кількістю врахованих збурень, тобто розмірністю n вектора X прийнятого в моделі.

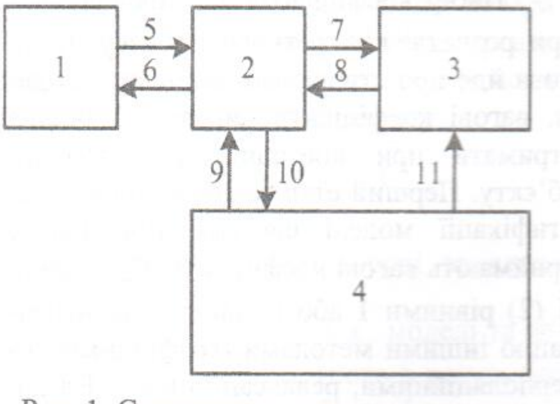

Рис. 1. Структурна схема моделюючого комплексу

На рис. 1 введено наступні позначення: 1 – ЕОМ; 2 – пристрій вводу-виводу (ПВВ); 3 – об'єкт сертифікації; 4 – моделююча система зовнішніх збурень; 5,6 – обмін даними ЕОМ з ПВВ; 7 – програма випробувань; 8 – реалізація програми випробовувань; 9 – реалізація зовнішніх збурень; 10 – змодельовані зовнішні збурення ЕОМ у відповідності з програмою випробувань, 11 – зовнішні збурення.

3. Об'єкт сертифікації (3) передає в ЕОМ реалізацію програми (8) у вигляді реалізованих в польоті задач (зовнішній зворотній зв'язок). Моделюючий комплекс, в свою чергу, видає в ЕОМ інформацію про реалізовані зовнішні збурення $\hat{X}$ (9), тобто реалізується внутрішній зворотній зв'язок.

4. ЕОМ проводить аналіз отриманої інформації від об'єкту сертифікації та моделюючої системи зовнішніх збурень. При цьому розв'язуються дві задачі. Перша – оцінка відповідності математичної моделі реальній системі. Друга, основна, – проводяться комплексні випробовування об'єкту з ціллю його сертифікації.

5. Оцінка адекватності моделі системі проводиться по виразу (9). Причому модель признається адекватною, якщо $\Delta \le 0{,}05$.

Алгоритм роботи моделюючого комплексу представлено на рис. 2.

Список літератури

1. *Идентификация* систем управления авиационных газотурбинных двигателей./ Под ред. В.Т. Дедеша. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с.

2. *Гроп Д.* Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с.

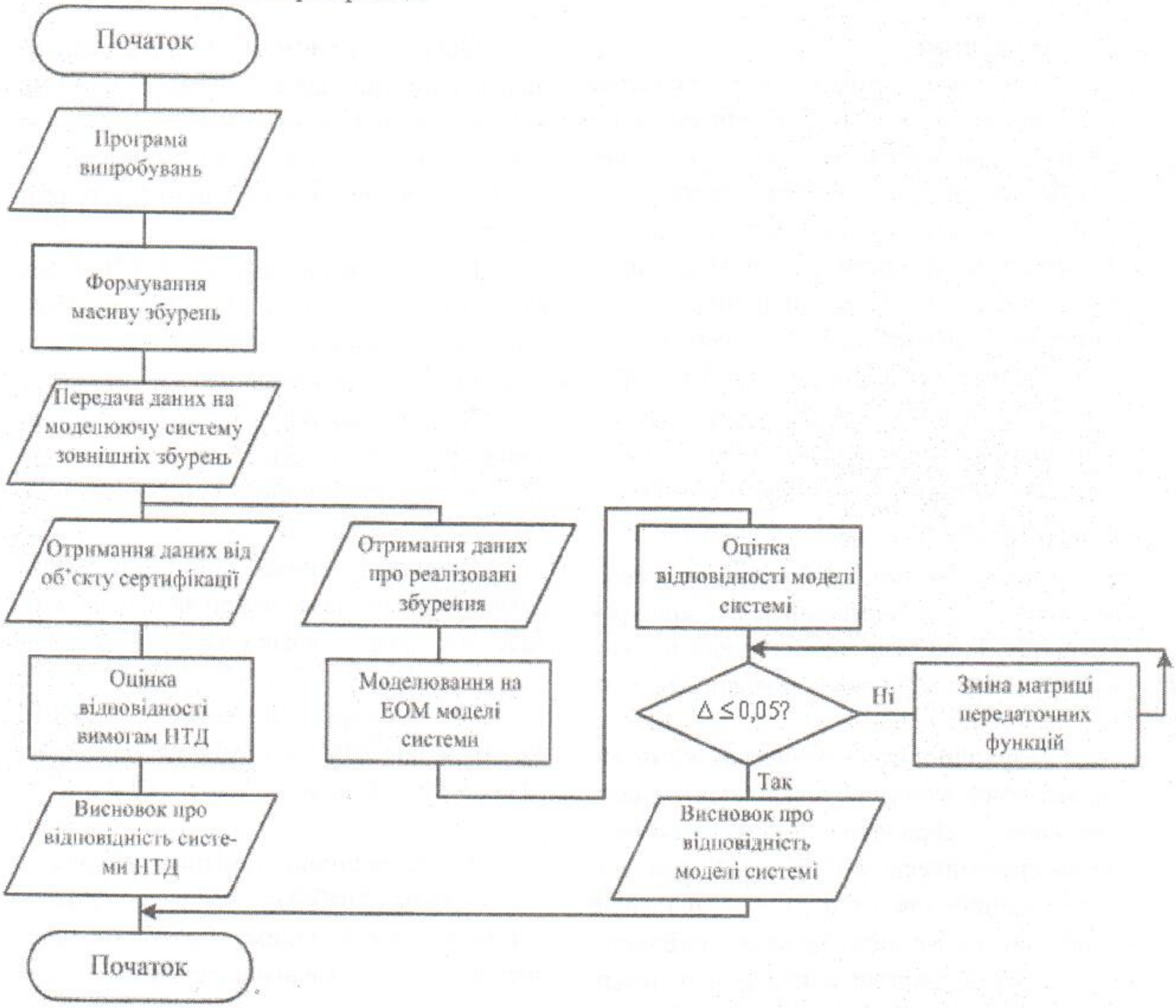

Рис. 2. Алгоритм роботи моделюючого комплексу