УДК 629.375.015.017.21
052-011.6

В.М. Казак, д-р техн. наук

МЕТОДИКА ВИБОРУ АЛГОРИТМУ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ПОШКОДЖЕНЬ ПОВЕРХНІ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА НА ЙОГО КЕРОВАНІСТЬ

Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: fsu@nau.edu.ua

Розглянуто проблему планування оптимального експерименту за умови одержання максимальної кількості інформації про механізм впливу пошкоджень зовнішньої поверхні літального апарата на його льотні характеристики під час обмежених витрат. Визначено критерії вибору оптимального експерименту.

Постановка проблеми

У процесі життєвого циклу аеродинамічні та технічні характеристики літального апарата (ЛА) під дією дестабілізуючих факторів змінюється. Найбільш небезпечними дестабілізуючими факторами є раптові пошкодження зовнішньої поверхні ЛА в польоті, що призводять до розвитку катастрофічної ситуації. У зв'язку з цим виникає проблема класифікації аеродинамічного і технічного стану ЛА з метою відновлення його живучості.

Вірогідність прийняття того чи іншого рішення при класифікації аеродинамічного стану ЛА залежить від коректності виявлення механізму явища. Для вирішення цієї проблеми потрібно знайти алгоритм планування оптимального експерименту.

Аналіз публікацій

Питанням збереження живучості ЛА (авіаційного комплексу) приділяється особлива увага, починаючи з самих ранніх стадій його життєвого циклу, і в подальшому на етапах заводських та державних випробувань перевіряються ступені її збереження в різноманітних умовах застосування з урахуванням дії основних зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів.

Однак передбачити всі можливі особливі ситуації в польоті практично неможливо. Тому необхідно заздалегідь виявити механізм впливу пошкоджень зовнішньої поверхні ЛА на його живучість, що дозволить організувати її відновлення за рахунок реорганізації керування польотом. Вирішити цю задачу можна склавши алгоритм планування оптимального експерименту.

Аналіз публікацій [1–4] показує, що теорія оптимального експерименту базується на критеріях математичної статистики і методах розв'язання екстремальних задач.

При цьому математична статистика використовується для формування та обґрунтування критеріїв оптимальності експерименту, а синтез оптимального плану зводиться до розв'язання деякої оптимальної задачі [2; 3].

Метою статті є розробка методики вибору алгоритму планування оптимального експерименту за умови одержання максимальної кількості інформації про механізм впливу пошкоджень зовнішньої поверхні ЛА на його льотні характеристики.

У загальному випадку проблема планування оптимального експерименту за умови одержання найбільшої кількості інформації I про механізм явища при обмежених витратах С являє собою задачу прийняття рішення вигляду [1; 4]:

$$X(N,M)_{opt} = \{X \in R_p : I(X) \to \max, C(X) \to \min\},$$

де $X(N, M)$ – матриця пошкоджень (тобто значень M вхідних змінних) у N спробах (план експерименту); R_p – множина всіх можливих планів.

Критерії інформативності й економічності є суперечними: із зростанням N інформативність експерименту зростає, але суттєво зростають також витрати часу і матеріальних коштів на його реалізацію. На практиці критерій мінімуму витрат зручно розглядати у вигляді параметричного обмеження:

$$N \le N^*;$$
$$N \in R_0,$$

де N^* – максимально припущена кількість спроб; R_0 – можлива кількість спроб.

Інформативність експерименту розглядатимемо як властивість матриці $X(N, M)$:

– наявність інформації про максимально можливу кількість суттєво різних станів ЛА незалежно від структури моделі та ступеня пошкодження його зовнішньої поверхні;

– максимізування вірогідності результатів експерименту в умовах випадкових перешкод.

Перша властивість має велике значення при моделюванні характеристик об'єктів із багатьма виходами, якими і є об'єкти дослідження [1; 4].

Друга властивість характеризує перешкодостійкість.

Перешкодостійкість експерименту справляє безпосередній вплив на перешкодостійкість алгоритму самоорганізації, а також на вірогідність рішень, які приймаються у разі раптового виникнення пошкоджень зовнішньої поверхні ЛА, або відмов його систем.

У реальній ситуації виникнення пошкодження поверхні чи відмов систем ЛА справляють різноманітний вплив на вихідну величину. У зв'язку з цим доцільно вимагати, щоб інформативність плану $X(N, M)$ слабко залежала від ступеня суттєвості того чи іншого пошкодження або відмови.

Припустимо, що одне (завчасно невідомо яке) пошкодження є суттєвим. Це означає, що експеримент буде проводитися не відповідно до матриці $X(N, M)$, а згідно з планом, який задається однією з m матриць

$$Xq\,(n, m-1),\ q=\overline{1,m}\,.$$

У цьому випадку існує небезпека того, що зрізана матриця буде утримувати однакові рядки, що зменшить кількість досліджених пошкоджень поверхні (відмов) ЛА. Отже, доцільно добиватися, щоб усі матриці $Xq\ (n,\ m)$ складалися з n різноманітних рядків. Введемо на множені всіх можливих N_0 спроб, метрику d, яка називається "міжспробна відстань" [1; 4]:

$$d_{ik}=\sum_{j=1}^{m} X_{ij}\otimes X_{kj},\ i=\overline{1,N_0-1},\ k=\overline{i+1,N_0}\,. \qquad (1)$$

Беремо:

$$X_{ij}\otimes X_{kj}=\begin{cases}1, & X_{ij}\neq X_{kj};\\ 0, & X_{ij}=X_{kj}.\end{cases}$$

Для будь якої матриці $X(N, M)$, яка складається з різноманітних рядків, мінімальна "міжспробна відстань" (1) не менше одиниці.

Припустимо, що кількість несуттєвих факторів $m = 1$. Якщо всі n рядків для будь якої з m матриць

$$X_q=(n, m\times m)$$

знову є різними, то $d_{\min}\geq 2$.

Аналогічно знаходимо, що

$$d_{\min}\geq \hat{m}+1 \text{ при } m=\hat{m}\,.$$

Тоді умови оптимальності (у розумінні максимальної інформативності) матриці $X\ (N,\ M)$ можна записати у вигляді [4]:

$$d_{\min}\to \max\,. \qquad (2)$$

Аналіз публікацій [1–4] показує, що критерій (2) є ефективним тільки при числі варіювання $K=2$. Із зростом K вибірковість критерію спадає, що призводить до безліч рішень.

Для усунення вказаного недоліку введемо додатковий критерій, який потребує на кожному кроці відбирати точки, які мають максимальну евклідову відстань до вже відібраних на попередньому кроці точок.

Введемо евклідову метрику:

$$\rho_{\ell k}=\left(\sum_{j=1}^{m}\left(X_{\ell j}-X_{kj}\right)^2\right)^{1/2},$$

$$\ell=\overline{1,N_0-1},$$

$$k=\overline{\ell+1,N_0}.$$

Задано обсяг експерименту n. При послідовному формуванні точок необхідно здійснити $S = N$ кроків. На довільному S кроці розрахуємо узагальнену евклідову відстань від конкуруючих точок до вже відібраних S-1 точок:

$$\rho_f=\sum_{i=1}^{S-1}\rho_{if}, \qquad (3)$$

$$f=\overline{1,F_d}\,,$$

де F_d – кількість точок, які відібрані за критерієм (2).

З F_d точок оберемо $F_p < F_d$ за вимогами

$$\rho_q\to \max\,. \qquad (4)$$

Суттєвість критерію (3) полягає в намаганні не тільки максимізувати "міжспробну відстань", але максимально охопити область експерименту, що також є умовою підвищення інформативності.

Критерії (2), (4) застосовують за вказаним порядком, тому що за індивідуальним критерієм (4) вибирають точки, які лежать на межах області експерименту і є неефективними у розумінні критерію (2).

З попереднього розглядання виникає, що проблема підвищення інформативності експерименту може бути вирішеною не тільки через збільшення кількості спроб, але і через їх оптимальне розташування в просторі станів зовнішньої поверхні ЛА.

Крім того, далеко не кожний план, який складається з n^* точок, є більш інформативним, ніж план, який містить $N < n^*$ спроб.

Дослідження процесу керування ЛА спряжено з наявністю жорстких обмежень на час реалізації процесу на ПЕОМ. Це дослідження частіше за все здійснюється методом статистичних експериментів.

Кожна окрема реалізація може утримувати десятки точок на шкалі часу.

Політ ЛА, який отримав пошкодження зовнішньої поверхні може описуватися набором із десяти і більше параметрів.

Отже, оцінка та суттєве скорочення витрат часу на реалізацію процесу керування на ПЕОМ у даному випадку є дуже важливим питанням, тому у разі розв'язання задачі моделювання завжди слід ураховувати фактор часу як один з основних факторів її розв'язку.

Математичні методи планування експерименту в багатьох випадках є загальними для моделей різноманітного походження.

При плануванні експерименту фактори X_i із натуральних змінних переводяться в кодовані X_i звичайно з обмеженням $-1 \leqq X_i < +1$, яке перетворює K-вимірний паралелепіпед у K-вимірний куб, а еліпсоїд у сферу.

З алгебричного погляду введення кодованих змінних $|X_i| = 1$ відображує намагання до створення стандартизованого набору оптимальних планів незалежно від субстанції та структури об'єкта дослідження.

Перехід від натуральних змінних до кодованих можна здійснити, наприклад, центруванням, яке в даному разі є перенесенням початку координат системи кодованих факторів X_i до центру експерименту з координатами в натуральних змінних:

$$X_{oi} = \frac{X_{i\min} + X_{i\max}}{2}.$$

Під час планування експерименту X_i варіюють звичайно на двох або на чотирьох рівнях скрізь рівні інтервали. Якщо при цьому зберігається принцип рівності інтервалів, що забезпечує симетрію їх зміни стосовно до центру плану, то можливо отримати трирівневі (+1, 0, –1) і п'ятирівневі плани (+2, +1, 0, –1, –2), де нуль – середнє значення впливу i-го пошкодження зовнішньої поверхні ЛА або відмов його систем.

У загальному вигляді політ ЛА для аналогових систем описується диференціальним рівнянням [3]:

$$\dot{X} = F\left(X, V_p, U, t\right) + V_{HP}(t), \tag{5}$$

для цифрових систем:

$$X(k+1) = F\left[X(k), V_P(k), U(k)\right] + V_{HP}(k), \tag{6}$$

де F – n-вимірна векторна функція аргументів; X, $X \in X^n$ – n -вимірний вектор стану ЛА; V_P, $V \in R^r$ – r-вимірний вектор можливих пошкоджень поверхні (відмов) ЛА, який визначається характером цих пошкоджень і регіструється бортовими вимірювачами; U, $U \in R^m$ – m-вимірний вектор керуючих дій, які формуються системою керування; t, $t \in [t_o, t_k]$ – поточний час, на якому визначено рівняння (5), (6), V_{HP}, $V_{HP} \in R^k$ – k-вимірний вектор дестабілізуючих факторів, які не реєструються бортовими вимірювачами.

Диференційні рівняння (5), (6) для аналогових систем можна зобразити у вигляді номінальної замкненої моделі ЛА:

$$\dot{X}(t) = (A_0 + B_0 G C_0) X(t), \tag{7}$$

для цифрових систем:

$$X(k+1) = (A_0 + B_0 G C_0) X(k). \tag{8}$$

Динамічна реакція систем (7), (8) у будь-який момент часу $t_0 \le t < t_k$ визначається за формулою [5]:

$$X(t) = \exp\{(A_0 + B_0 G C_0) t\} X(t_0), \tag{9}$$

де A_0 – матриця стану ЛА, $n \times n$; B_0 – матриця керування $n \times m$; C_0 – матриця вимірювання, $n \times r$; G – матриця коефіцієнтів підсилювання.

Зі структурного погляду, вирази (7) – (9) правдиві, якщо пара *(A, B)* керована, а пара *(C, A)* є спостережувана. Під впливом пошкоджень і відмов ЛА матриці номінальної системи (7) або (8) зазнають варіації деяких чи всіх своїх елементів [6]:

$$\begin{aligned} A &= A_0 + \Delta A; \\ B &= B_0 + \Delta B; \\ C &= C_0 + \Delta C. \end{aligned} \tag{10}$$

Якщо підставити значення (10) у вираз (7), то одержимо замкнену модель ЛА, який одержав пошкодження зовнішньої поверхні або відмови складових систем:

$$\dot{X}(t) = [A_0 + \Delta A + (B_0 + \Delta B) G (C_0 + \Delta C)] X(t). \tag{11}$$

Аналіз співвідношення (11) показує, що кількість можливих станів замкненої системи "ЛА – система керування польотом" визначається множиною факторів

$$S = \{\Delta A, \Delta B, \Delta C\},$$

що впливають на рух ЛА.

Експеримент, який складається з $N_0 = K^S$, де K – кількість рівнів варіювання; S – кількість факторів, називається повним факторним експериментом [4]. Він дозволяє добути максимально можливу кількість інформації про аеродинамічний або технічний стан ЛА при заданих S і K.

Під час моделювання просторового руху ЛА, що описується виразами (5) чи (6), навіть при самому нечисленному виборі кількості можливих пошкоджень (відмов) ЛА

$$S = n + r + m = 13$$

на чотирьох рівнях варіювання $K = 4$ неважко визначити кількість випробувань повного факторного експерименту [1]:

$$N_0 = K^S = 4^{13} = 67\,108\,864.$$

Ураховуючи, що кожна окрема спроба містить багато десятків точок, виконування такого плану та обробка його результатів навіть на сучасних ПЕОМ неможливі.

Задача планування інформаційного експерименту уявляється як задача вибору n спроб зі всіх можливих N_0. При цьому вибір мінімального числа n спроб проводиться так, щоб одержати максимально можливу інформацію про процес руху пошкодженого ЛА у всьому діапазоні умов його функціонування.

У зв'язку з цим як критерії вибору оптимального експерименту будемо сумісно використовувати такі критерії [1; 4]:

– мінімальну хемінгову відстань між рядками плану, тобто мінімальну кількість збігу в стовпцях двох наступних рядків матриці оптимального плану $d_{\min}$;

– максимальну евклідову відстань між точками плану тобто максимальну суму квадратів різниць по стовпцях наступних рядків матриці плану $\rho_{\max}$.

Висновки

Для коректної постановки та розв'язання математичної задачі синтезу оптимального керування енергодинамічними (аеродинамічними) характеристиками пошкодженого ЛА необхідно:

– визначити змінні, які описують параметри аеродинамічного стану ЛА та параметри керування ним;

– скласти математичну модель процесу функціонування ЛА за наявності пошкоджень його зовнішньої поверхні та їх відсутності як об'єкта керування;

– визначити одновимірну чи багатовимірну функцію, тобто критерій якості керування, за допомогою якого визначається задача керування;

– скласти математичне співвідношення, яке описує обмеження, що накладаються на змінні стану ЛА або керування ним;

– визначити метод (алгоритм) мінімізації (максимізації) критеріїв якості керування.

Список літератури

1. *Бояринов И.В., Бояринова Ю.Е., Казак В.Н.* Метод группового учета аргументов в задачах идентификации динамических характеристик летательных аппаратов //Зб. наук, пр., Т. 4. – Днепропетровск: Навч. кн., 2001. – С. 14–24.

2. *Волгин Л.Н.* Идентификация линейного динамического объекта с помощью аппроксимации Паде //Техн. кибернетика. № 6. – М.: Наука, 1993.–С. 114–117.

3. *Казак В.Н., Бояринов В.А.* Оценивание параметров математической модели беспилотного летательного аппарата // Проблеми експлуатації та надійності авіаційної техніки: Зб. наук. пр. – К.: КМУЦА, 1998. – С. 67–70.

4. *Кикоть В.С.* Планирование эксперимента в задачах самоорганизации математических моделей //Автоматика. № 1. – К.: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова, 1984. – С. 32–39.

5. *Казак В.Н.* Оцениватель для одного класса реконфигурируемых систем управления // Вісн. КМУЦА. 1998. – № 1. – С. 231–236.

6. *Бруссард Р., Мердер Д.Д., Хальо Н., Каглайан А.К.* Применение рассчитанных заранее законов управления в реконфигурируемой системе управления полетом //Аэрокосмическая техника.– 1989. –№2. – С. 33–42.

Стаття надійшла до редакції 04.04.03.

В.М. Казак

Методика выбора алгоритма планирования эксперимента для проведения исследования влияния повреждений поверхности летательного аппарата на его управляемость

Рассмотрена проблема планирования оптимального эксперимента при условии получения максимального количества информации о механизме влияния повреждений внешней поверхности летательного аппарата на его летные характеристики при ограниченных затратах. Определены критерии выбора оптимального эксперимента.

V.M. Kazak

The methodic of choosing the algorithm of planning the experiment for making the research of aircraft surface damage influence the aircraft's controllability

The problem of planning the optimal experiment under the conditions of getting the maximum information about the mechanism of influence the aircraft surface damage the aircraft's flight characteristics under the limited expenses is considered. The criterions of choosing the optimal experiment are defined.