

УДК 389.14

О.М. Папченко, д-р техн. наук

КОРЕГУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ ПОЛЬОТУ

Національний транспортний університет, e-mail: gia@ntu.edu.ua

Розглянуто питання підвищення точності вимірювань під час реєстрації параметрів у динамічних режимах польоту літального апарату на підставі аналізу та дослідження динамічної похибки датчиків для її обліку у довільні моменти часу.

Вступ

Існуючі методики льотних випробувань передбачають у більшості випадків виконання малоінформаційних сталих або квазісталих режимів польоту літальних апаратів. Значною мірою це спричинено тим, що бортові засоби вимірювання забезпечують задовільні результати у статичному режимі роботи й істотно спотворюють картину на нестационарних ділянках польоту літальних апаратів. Одержання достовірної інформації на несталих режимах польоту дозволяє скоротити період льотних випробувань і загальний цикл створення та впровадження в експлуатацію нових типів авіаційної техніки.

Методика досліджень

Найбільший інтерес проблема динамічних вимірювань викликає з точки зору аналізу та дослідження динамічної похибки. Практично будь-який вимірювальний пристрій має у своєму складі інерційні елементи: рухомі маси, пружини, ємності, індуктивності, теплоємні елементи тощо. Ці елементи в процесі роботи можуть запасати, а потім виділяти енергію вхідного фізичного сигналу, попередньо перетворену у відповідну природі інерційного елемента форму подання (механічну, електричну, теплову та ін.).

Кількість енергії, що запасється, залежить від величини вхідного сигналу та швидкості його вимірювання. Це призводить до того, що поточне значення сигналу на виході вимірювального обладнання залежить не тільки від миттєвого значення вхідного сигналу, але і від запасеної інерційними елементами енергії, форми вхідного сигналу та ін.

Індивідуальний внесок різних вимірювальних перетворювачів у загальну картину динамічних переключень результатів вимірювань суттєво різниться.

Інерційність електронних компонентів вимірювального каналу (ВК) на декілька порядків нижче, ніж механічних та електромеханічних.

У динаміці електронні компоненти ВК можна описувати безінерційними підсилюючими лан-

цюгами, які характеризуються тільки статичним коефіцієнтом передачі.

Практично єдиним елементом, який визначає усю динаміку ВК, є датчик, динамічні якості якого підлягають дослідженню.

Унаслідок своїх конструктивних властивостей більшість застосовуваних у льотних випробуваннях датчиків, або тільки чутливих елементів (ЧЕ) датчиків, можуть розглядатися як лінійні динамічні об'єкти з зосередженими параметрами.

Постановка завдання

Обмежимося розгляданням датчика як лінійної системи, тобто механічної системи, яка описується лінійними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами. Лінійну систему будь-якої складності можна звести до одного з так званих типових ланцюгів, або до деякої їх комбінації. Під типовим лінійним ланцюгом розуміється така сукупність елементів, перехідний процес в якій описується звичайними лінійними диференціальними рівняннями не вище другого порядку.

Як зазначається в літературі [1], за невеликим виключенням диференціальні рівняння вимірювальних пристроїв описуються моделлю вигляду:

$$a_2 \ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_0 x(t), \quad (1)$$

де $y(t)$ – вихідний сигнал, який знімається з виходу; ЧЕ $x(t)$ – вхідний фізичний вплив на ЧЕ датчика.

У загальному випадку для ЧЕ характерна наявність коливального перехідного процесу на виході при подачі на вхід скіку подібного сигналу, тобто модель являє собою коливальний ланцюг другого порядку [2].

Для зручності аналізу вводимо позначення:

$$\omega_0^2 = \frac{a_0}{a_2};$$

$$\beta = \frac{a_1}{2\omega_0};$$

$$c = \frac{b_0}{a_2}.$$

Тоді з рівняння (1) одержимо:

$$\ddot{y}(t) + 2\omega_0\beta\dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = cx(t). \quad (2)$$

Вирішуючи рівняння (2) відносно $y(t)$ при $x(t)=1(t)$, тобто при подачі на вхід одиничного східчастого впливу, знаходимо вираз для передатної характеристики ЧЕ:

$$H(t) = \frac{c}{\omega_0^2} \left\{ 1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}} [\sqrt{1-\beta^2} \times \right. \\ \left. \times \cos(\omega_0\sqrt{1-\beta^2}t) + \beta \sin(\omega_0\sqrt{1-\beta^2}t)] \right\}.$$

Диференціювання цього рівняння дає формулу імпульсної характеристики ЧЕ:

$$h(t) = \frac{c}{\omega_0} \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin(\omega_0\sqrt{1-\beta^2}t).$$

Зображення рівняння (2) за Лапласом має вигляд:

$$(p^2 + 2\omega_0 p\beta + \omega_0^2)u(p) = cx(p),$$

де p – комплексна змінна; $x(p)$, $u(p)$ – зображення за Лапласом вхідного і вихідного сигналів.

Після перетворення Лапласа над виразом (2) з урахуванням прийнятих позначень можна записати передавальну функцію для ЧЕ [3]:

$$W(p) = \frac{c}{p^2 + 2\omega_0\beta p + \omega_0^2}. \quad (3)$$

Поклавши в рівняння (3) $p = j\omega$, переходимо до комплексної частотної характеристики:

$$k(j\omega) = \frac{c}{-\omega^2 + 2j\omega\omega_0\beta + \omega_0^2}.$$

Амплітудно-частотна характеристика має вигляд:

$$|k(j\omega)| = \frac{c}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega_0^2\omega^2}},$$

фазочастотна характеристика:

$$\varphi = \arg[k(j\omega)] = \operatorname{arctg} \frac{2\beta\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

Відношення c/ω_0^2 , яке єднає сталі значення вхідного та вихідного сигналів ЧЕ, являє собою статичний коефіцієнт передачі ЧЕ K_d .

Модель ВК з урахуванням динамічних характеристик можна подати послідовними сполуками двох частин: лінійної динамічної (ЧЕ датчика), яка описується лінійним коливальним ланцюгом другого порядку, та нелінійною безінерційною (послідовність рухомої системи та дрогового по-

тенціометру датчика, вимірювальних перетворювачів), які описуються деякою функцією перетворення $F(X_1)/K_d$ (рис. 1).

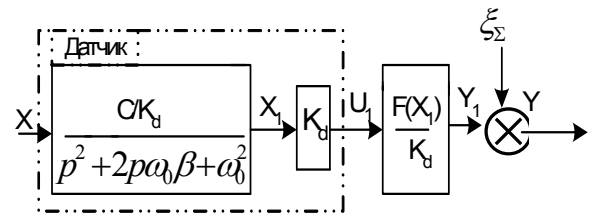


Рис. 1. Модель ВК

Функція перетворення над сигналом, який проходить по всьому ВК для статичного режиму роботи, має вигляд $Y=F(X_1)$. Якщо K_d включити в безінерційну частину моделі, виходом ЧЕ буде деякий сигнал $X_1(t)$ тієї самої фізичної розмірності, що і вхідний сигнал $X(t)$. Відрізнитися ці сигнали будуть лише динамічною похибкою $E_{\text{дин}}$, яка входить у сигнал $X_1(t)$:

$$E_{\text{дин}}(t) = X_1(t) - X(t) = -\ddot{X}(t) - 2\omega_0\beta\dot{X}(t). \quad (4)$$

Застосовуючи запис в операторських зображеннях і операцію оберненого перетворення Лапласа, одержимо вираз сумарної похибки вимірювання на виході:

$$E_y(t) = F\{E_{\text{дин}}(t)\} + \xi_{\Sigma}(t) = \\ = F(L^{-1}\{X(p)[W(p)-1]\}) + \xi_{\Sigma}(t).$$

Значення похибки, перераховане до входу ВК, дорівнює:

$$E_x(t) = F^{-1}[E_y(t)] \approx E_{\text{дин}}(t) + F^{-1}(\xi_{\Sigma}).$$

Якщо аналітична корекція випадкової похибки $F^{-1}(\xi_{\Sigma})$, обумовленої наявністю квантування в потенціометричному перетворювачі датчика і тракті передачі ВК, неможлива, то компенсація динамічної похибки $E_{\text{дин}}(t)$ шляхом її аналітичного обліку здійснима.

Для цього в ідеальному випадку за наявності сигналу $X_1(t)$, який не є зашумленим, було б достатнім додати до нього відповідно до виразів (3), (4) виправлення, пропорційні першій і другій похідним за часом від сигналу $X_1(t)$:

$$X(t) = X_1(t) + \ddot{X}_1(t) + 2\omega_0\beta\dot{X}_1(t) = \\ = (1:c)L^{-1}\{Y(p)[1+p^2+2p\omega_0\beta]\}.$$

У реальній ситуації, коли результати вимірювань містять шум, їх слід згладжувати, пропустивши через фільтр W_d , а одержану на його виході оцінку $\tilde{Y}_1(t)$ перерахувати за допомогою оберненої функції перетворення у згладжений сигнал

$$\tilde{X}_1(t) = F^{-1}\{\tilde{Y}_1(t)\}$$

та застосувати до останнього виразу процедуру компенсації динамічної похибки

$$\tilde{X}(t) = \tilde{X}_1(t) + 2\omega_0\beta\dot{\tilde{X}}_1(t) + \ddot{\tilde{X}}_1(t). \quad (5)$$

Очевидно, здійснення компенсації не завжди виправдано, тому для розрахунку поправок, що компенсують, використовуються наближені оцінки поточних значень процесу $X_1(t)$ та знайдені експериментально оцінки параметрів ω_0 і β чутливого елемента датчика (рис. 2).

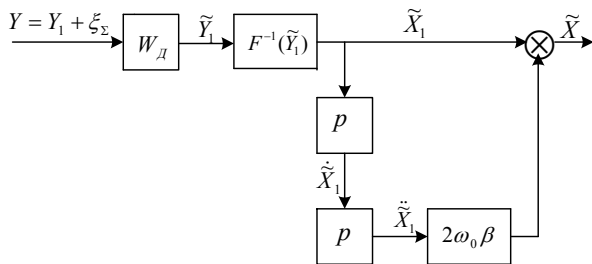


Рис. 2. Блок-схема компенсації динамічної похибки

Результати випробувань

У результаті поправка, яка розраховується за експериментальними даними, є випадковий процес, значення якого залежно від точності оцінювання $X_1(t)$, ω_0 , β можуть мати розкид відносно “істинного” значення поправки. Якщо величина розкиду виявиться порівняно з величиною компенсації динамічної похибки, зміст уведення останньої зникає.

Дисперсію компенсації, яка уводиться відповідно до виразу (5), можна приблизно розрахувати за формулою

$$D\{E_{\text{аєі}}(t)\} = D\{\tilde{X}_1(t)\} + [2\sigma_{\tilde{\omega}_0}\tilde{\beta}\dot{\tilde{X}}_1(t)]^2 + [2\sigma_{\tilde{\beta}}\tilde{\omega}_0\dot{\tilde{X}}_1(t)]^2 + 4D\{\tilde{X}_1(t)\}\tilde{\omega}_0^2\tilde{\beta}^2,$$

де дисперсії $\sigma_{\tilde{\omega}_0}^2$ і $\sigma_{\tilde{\beta}}^2$ оцінок параметрів динамічних характеристик ЧЕ та дисперсії першої та другої похідних згладженого процесу $\tilde{X}_1(t)$ визначаються залежно від прийнятих методів оцінювання параметрів або засобів згладжування та обчислювання похідних.

Висновки

Викладені результати дослідження інформаційно-вимірювального каналу та розробка методології корекції похибки вимірювань на динамічних режимах польоту дозволяють підвищити достовірність даних вимірювань при несталих маневрах літальних апаратів.

Такий підхід до проблеми інтенсифікації льотних випробувань з одночасним підвищенням безпеки польоту за рахунок створення та впровадження нових методів обробки та аналізу експериментальних даних на базі широкого впровадження засобів обчислювальної техніки забезпечує скорочення витрат та часу проведення льотно-дослідних робіт.

Список літератури

1. Вострокнутов Н.Г., Евстихеев Н.Н. Информационно-измерительная техника. – М.: Высш. шк., 1977. – 232 с.
2. Азизов А.М., Гордов А.Н. Точность измерительных преобразователей. – Л.: Энергия, 1975. – 256 с.
3. Грановский В.А. Динамические измерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 220 с.

Стаття надійшла до редакції 20.01.05.

О.М. Папченко

Коррекция результатов измерений на динамических режимах полета

Рассмотрены вопросы повышения точности измерений при регистрации параметров на динамических режимах полета летательного аппарата на основе анализа и исследования динамической погрешности датчиков для учета ее в произвольные моменты времени.

O.M. Papchenko

Correction of measurements results on dynamic modes of flight

Questions of increase accuracy of measurements are considered at registration of parameters on dynamic modes of flight any flying device on the basis of the analysis and research dynamic errors of gauges for its account during the any moments of time.