

УДК 621

Нелінійна модель системи первинного контролю політом «ЕМП-ЗАКРИЛКИ»

Лук'янов¹ П.В., канд. фіз.-мат. наук, с. н. с., Бадах¹ В.М., к. т. наук, с.н.с., Павлова К.С.¹, аспірантка

1- Національний авіаційний університет, Київ, Україна

Анотація. Шляхом критичного аналізу існуючої інформації моделей, що описують системи первинного контролю «ЕМП-закрилки» виявлено ряд недоліків цих моделей. Одним із суттєвих недоліків є лінеаризація кінематики руху закрилок, що є не зовсім коректним. Запропонована модель, що враховує нелінійну кінематику взаємного руху штоку електромеханічного приводу і закрилок

Ключеві слова: система «електромеханічний привід-закрилки», нелінійна математична модель

Вступ

Попередні 20-30 років характеризують перехід в авіації до більшого використання електричної складової в системах керування. Зокрема це стосується систем первинного контролю польотом. Для забезпечення надійності та швидкодії в керуванні, слід використовувати досконалі математичні моделі, що описують фізичні процеси, зокрема під час роботи електромеханічних приводів.

В даний час, поряд з гідравлічними, в авіації використовуються також електрогідростатичні та електромеханічні приводи [1,2]. Ретельний аналіз цих моделей виявив їхні недоліки. Одним із них є невиправдана лінеаризація математичної моделі і, як наслідок, втрата точності управління [1,2].

Тут основну увагу приділимо нелінійній моделі, що описує фізичні процеси, які відбуваються у системі первинного контролю польотом.

Нелінійна динаміка взаємопов'язаного руху штока електромеханічного приводу та закрилок закрилки.

Детальне дослідження існуючого моделювання, зазначеного в назві явища виявило, з одного боку, належного опису кінематичного зв'язку «зміна довжини штока – кут повороту закрилок» та, з іншого боку, врахування ці зміни у часі навантаження на штоку та моменту зусиль, що діє на закрилки [1,2]. Щоб усунути зазначені недоліки, докладно розглянемо кінематику та динаміку системи «шток-закрилки». За основу візьмемо схему, наведену в роботі [1], показану на малюнку 1. Система має три вісі обертання, що позначені точками O_1 , O_2 і $A_{1,2}$. При цьому справедливі наступні співвідношення :

$$O_1O_2 = a = \text{Const}; \quad A_1B_1 = A_2B_2 = \text{Const}; \quad O_2B_1 = O_2B_2 = l_j = \text{Const}.$$

α_a -- кут повороту закрилок, O_1A_1 і O_2A_2 -- довжина відстані між осями повороту O_1 та A_j , ($i=1,2$), яка змінюється у часі і тому позначена невідомою x . У довільний момент часу має місце співвідношення (за теоремою косінусів):

$$\cos \alpha_a = \frac{x^2 + l_j - a^2}{2x \cdot l_j}, \quad \text{або} \quad \sin \alpha_a = \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + l_j - a^2}{2x \cdot l_j} \right)^2}.$$

Момент сили навантаження на штоці відносно вісі обертання, що проходить крізь точку O_2 , дорівнює:

$$M_j = -F_L \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + l_j - a^2}{2x \cdot l_j} \right)^2} \cdot l_j.$$

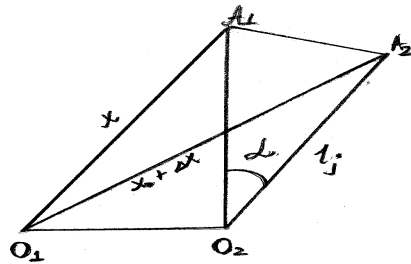


Рис. 1 Геометрія повороту штоку електромеханічного приводу

Другим є момент сили опору на закрилок M_h . Для знаходження взаємозв'язку між довжиною штока електромотору и кутом повороту закрилок використаємо рис. 2. Нехай $\angle O_1 O_2 A_1 = \beta_0 \Leftrightarrow \delta = 0$. Тоді у довільний момент часу, знову ж таки, за теоремою косинусів маємо:

$$\cos(\beta_0 + \delta) = \frac{a^2 + l_j^2 - x^2}{2al_j}, \text{ звідки } \delta = \delta(x) = -\beta_0 + \arccos\left(\frac{a^2 + l_j^2 - x^2}{2al_j}\right).$$

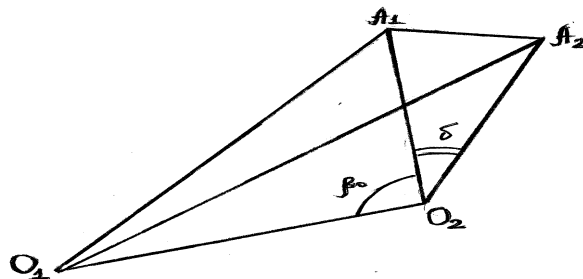


Рис. 2. До визначення моменту сили опору закрилок.

Останнє співвідношення і є шуканий взаємозв'язок між кутом повороту закрилок і миттєвим значенням довжини штоку. Для подальшого знадобиться значення першої та другої похідних кута повороту закрилок у часі. Знайдемо їх.

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\delta}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{x}{ab \sqrt{1 - \left(\frac{a^2 + l_j^2 - x^2}{2al_j} \right)^2}} \frac{dx}{dt},$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{x}{ab \sqrt{1 - \left(\frac{a^2 + l_j^2 - x^2}{2al_j} \right)^2}} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{-0.5x^4 + 1.5a^2x^2 + 1.5l_j^2x^2 - 2a^2l_j^2 - a^4 - l_j^4}{4a^3l_j^3 \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a^2 + l_j^2 - x^2}{2al_j} \right)^2} \right)^3} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2.$$

Отже, ми отримали співвідношення

$$\delta = \delta(x), \quad \frac{d\delta}{dt} = f_1 \left(x, \frac{dx}{dt} \right), \quad \frac{d^2\delta}{dt^2} = f_2 \left(x, \frac{dx}{dt}, \frac{d^2x}{dt^2} \right).$$

Перейдемо до динамічної частини задачі і застосуємо до закрилок закон зміни кінетичного моменту. Для обертання відносно вісі у точці O_2 цей закон перетворюється на одне скалярне рівняння

$$J \frac{d^2\delta}{dt^2} = \sum_i M_i^e, \quad (1)$$

де M_i^e -- сума моментів зовнішніх сил, що прикладені до закрилок.

З рівняння (1), після підстановки виразів для моментів, отримуємо наступне співвідношення:

$$f_2 \left(x, \frac{dx}{dt}, \frac{d^2x}{dt^2} \right) \cdot J = M_h(t) - F_L(t) \cdot l_j \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + l_j^2 - a^2}{2l_j x} \right)^2}. \quad (2)$$

Це нелінійне диференціальне рівняння. Його можна розв'язати лише чисельно. Друге рівняння для ЕМП має вигляд [1]

$$m_{ema} \frac{d^2x_{ema}}{dt^2} = c_{BS} \cdot (x_{ema} - l_{hs} \cdot \varphi_G) + d_{BS} \left(\frac{dx_{ema}}{dt} - l_{hs} \cdot \frac{d\varphi_G}{dt} \right) - F_{fr,bs} + F_L(t). \quad (3)$$

В рівнянні (3) $F_{fr,bs}$ -- сила тертя Шрибека.

Повна система рівнянь, що описує модель ЕМП-закрылки.

Якщо до рівнянь (2), (3) додати ще чотири наступні [1]

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (U_d - RI_d + \omega_{el} \cdot L_q \cdot I_q), \quad (4)$$

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_q} [U_q - RI_q - \omega_{el} \cdot (\Psi_{PM} + L_d \cdot I_d)], \quad (5)$$

$$J_{mot} \frac{d^2 \varphi_{mot}}{dt^2} = \frac{3Z_p}{2} [(L_d - L_q) I_d I_q + \Psi_{PM} I_q] - M_{fr,mot} - M_{L,mot}, \quad (6)$$

$$J_{tot} \frac{d^2 \varphi_G}{dt^2} = -C_{rot} (\varphi_b - \varphi_{mot}) - d_{rot} \left(\frac{d\varphi_G}{dt} - \frac{d\varphi_{mot}}{dt} \right) - M_{fr,rot} + M_L, \quad (7)$$

то загалом отримується повна система рівнянь, яка описує модель ЕМП - закрылки.

Зазначимо, що в рівняннях $I_{d,q}, L_{d,q}$ и $U_{d,q}$ -- струм, індуктивність та напруга уздовж осей q та d відповідно; R -- опір двигуна, ω_{el} -- кутова швидкість фізичного поля, що обертається, Ψ_{PM} -- магнітний потік сталого магніту. При кількості полюсів Z_p кутова швидкість механічного мотору $\omega_{mot} \in$

$$\omega_{el} = Z_p \omega_{mot}.$$

Висновки.

В системі первинного контролю польотом, яка містить у собі електромеханічний привід і закрылки, загальна модель, що описує роботу зазначеної системи, є нелінійною. І, що важливо, нелінійною є також кінематика системи «шток-закрылки».

Список літератури

1. Cochoy O. Concepts for position and load control for hybrid actuation in primary flight control / O. Cochoy, S. Hanke, and Carl UB// Aersp. Technol. – 2007 – Vol. 11, p. 194—201.
2. Qiao G. A review of electromechanical actuators for More/All Electrical aircraft systems/ Guan Qiao, Geng Liu, Zhenghong Shi, Yawen Wang, Shangjan Ma and Teik C Lim // J. Mechanical Engineering Science – 2018 -- Vol. 232(22), p. 4128—4151.

Primary flight control system “EMA-flaps” non-linear model

Lukianov P.V., Badach V.M., Pavlova K.S.

Abstract. Through a critical analysis of the existing information on the models describing the primary control systems of "EMA- flaps", a number of shortcomings of these models were revealed. One of the significant drawbacks is the linearization of the flap movement kinematics, which is not entirely correct. The proposed model takes into account the nonlinear kinematics of the mutual movement of the electromechanical actuator rod and flaps

Key words: "electromechanical actuator-flaps" system, nonlinear mathematical model