

ВПЛИВ ЖОРСТКОСТІ ОПОРИ КРІПЛЕННЯ ГІДРОМЕХАНІЧНОГО РУЛЬОВОГО ПРИВОДА НА ЙОГО ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Було досліджено динамічні характеристики рульового привода із оберненою кінематикою, оскільки такий тип кінематичної схеми має протифлатерні властивості, що актуально для системи траєкторного керування літаком [1].

Оцінка динамічних властивостей рульового привода літака може бути здійснена двома способами: за результатами реакції привода на вхідний сигнал $x_{\text{вх}}$ за відсутності і за наявності навантаження на вихідну ланку; за аналізом реакції рульового привода на збурення, що діє на вихідну ланку при затиснутому вхідному керуванні $x_{\text{вх}} = 0$.

Для визначення запасів стійкості рульового привода за амплітудою і фазою використовується передаточна функція розімкнутого контуру рульового привода наступного вигляду [2]:

$$W_{\text{пр}}(S) = \frac{y(S)}{\varepsilon(S)} = \frac{D \left(\frac{m}{C_{\text{пр}}} S^2 + \frac{h^e}{C_{\text{пр}}} S + 1 \right)}{S(T_{\text{к}}^2 S^2 + 2T_{\text{к}} \xi_{\text{к}} S + 1)} = \frac{a_2 S^2 + a_1 S + a_0}{b_3 S^3 + b_2 B^2 + b_1 S}$$

$$\text{де } a_2 = \frac{Dm}{C_{\text{пр}}}; \quad a_1 = \frac{Dh^e}{C_{\text{пр}}}; \quad a_0 = D; \quad b_3 = T_{\text{к}}^2; \quad b_2 = 2T_{\text{к}} \xi_{\text{к}}; \quad b_1 = 1;$$

$$T_{\text{к}} = \sqrt{\frac{m}{C_{\Sigma}}}; \quad \xi_{\text{к}} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{mC_{\Sigma}}{B}} \left(1 + \frac{D \cdot B}{C_{\text{пр}}} + \frac{D \cdot B}{C_o} \frac{k_{\text{д.о}}}{k_{3.3}} \right) + \frac{h^e}{\sqrt{mC_{\Sigma}}} \right];$$

$$C_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{C_o} + \frac{1}{C_{\text{пр}}} + \frac{1}{C_r}}; \quad B = \frac{F^2}{k_{\text{н}}^e}; \quad k_{\text{н}}^e = k_{\text{Др}} + k_{\text{внт}};$$

де m – зведена маса рульової поверхні і силової проводки керування; y – вихідна координата; ε – неузгодженість на золотнику; $C_{\text{пр}}$ – зведена жорсткість силової проводки керування; C_o – жорсткість опори кріплення; $k_{\text{до.}}$ – коефіцієнт, що враховує деформацію опори кріплення; $k_{\text{з.з.}}$ – коефіцієнт зворотнього зв'язку; C_r – жорсткість гідравлічної пружини; F – площа поршня рульового привода; D – добротність привода; k_{Qp} – коефіцієнт підсилення за тиском; $k_{\text{віт}}$ – коефіцієнт витоків

Для розрахунку логарифмічних амплітудно-фазочастотних характеристик використовувались залежності:

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg(\sqrt{\text{Re}(W_{\text{пр}}(j\omega))^2 + \text{Im}(W_{\text{пр}}(j\omega))^2})$$

$$\psi(\omega) = \arctg\left(\frac{\text{Im}(W_{\text{пр}}(j\omega))}{\text{Re}(W_{\text{пр}}(j\omega))}\right)$$

де $\text{Re}(W_{\text{пр}}(j\omega))$, $\text{Im}(W_{\text{пр}}(j\omega))$ – відповідно дійсна і уявна частини передаточної функції.

Розрахунки проводились для діапазону колової частоти $\omega = 1 \dots 1000 \text{ с}^{-1}$ з кроком $\Delta\omega = 1 \text{ с}^{-1}$. За результатами розрахунків отримано амплітудну і фазову частотні характеристики розімкнутого привода (рисунок 1,а).

Для оцінки протифлатерних характеристик рульового привода використовувалась передаточна функція виду [3]:

$$G(S) = G_0 \frac{TS + 1}{\frac{G_0}{G_\infty} TS + 1}$$

де $T = 1/D$ – стала часу привода; G_0 – статична жорсткість привода. $C_\infty = C_\Sigma$ – амплітудна складова динамічної жорсткості привода при частоті збурюючої сили $\omega \rightarrow \infty$

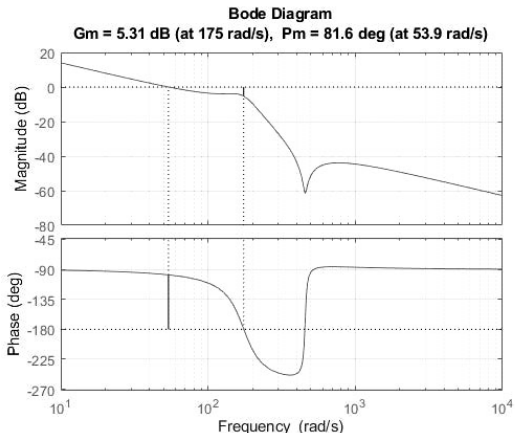
Розрахунок амплітудної і фазової характеристик динамічної жорсткості рульового привода виконувалось, використовуючи співвідношення:

$$A_G(\omega) = \sqrt{\text{Re}(G(j\omega))^2 + \text{Im}(G(j\omega))^2} ;$$

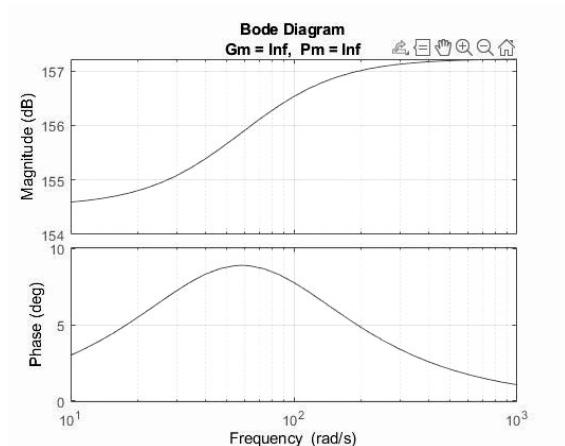
$$\psi(\omega) = \arctg\left(\frac{\text{Im}(G(j\omega))}{\text{Re}(G(j\omega))}\right),$$

де $\text{Re}(G(j\omega))$, $\text{Im}(G(j\omega))$ – відповідно дійсна і уявна частини передаточної функції $G(S)$.

За результатами розрахунків отримано амплітудну і фазову частотні характеристики розімкнутого привода (рисунок 1, б).



a



б

Рисунок 1 – Динамічні характеристики рульового привода з оберненою кінематикою; $C_o = 15 \cdot 10^7$ Н/м; а – амплітудні і фазові частотні характеристики для привода з розімкнутим контуром; б – амплітудні і фазові частотні характеристики динамічної жорсткості

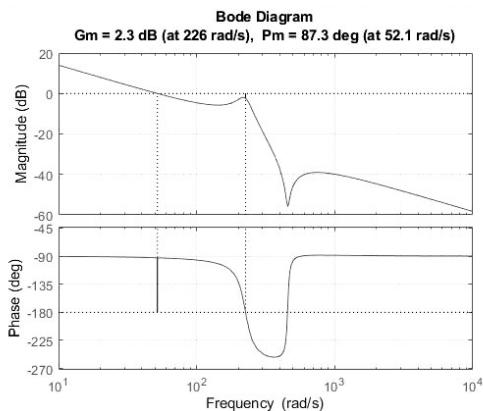
Результати досліджень представлено у таблиці 1. Збільшення жорсткості опори кріплення призводить до зменшення запасів стійкості з амплітудою в межах від 20–30%. Запас стійкості за фазою при цьому збільшується від 2% до 5%, значення динамічної жорсткості зростає на 2%. При цьому зменшення запасів стійкості за амплітудою не є критичним для рульового привода, оскільки зростає запас стійкості за фазою і значення динамічної жорсткості.

Таблиця 1 – Результати досліджень динамічних характеристик

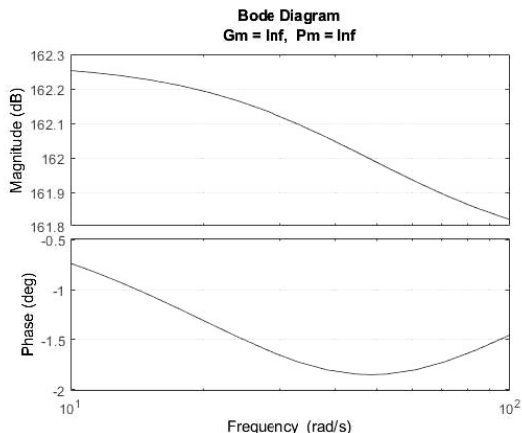
Значення жорсткості C_0 , Н/м	Запас стійкості за амплітудою ΔL , dB при частоті ω , rad/s		Запас стійкості за фазою $\Delta\phi$, deg при частоті ω , rad/s		Значення динамічної жорсткості $G(S)$, dB	Протифлатерні властивості рульового привода
$15 \cdot 10^7$	5,31	175	81,6	53,9	157,2	+
$30 \cdot 10^7$	4,1	201	85,1	52,8	159,7	+
$60 \cdot 10^7$	2,9	219	86,7	52,3	161,135	+
$90 \cdot 10^7$	2,3	226	87,3	52,1	161,83	-

Рульовий привод із оберненою кінематикою має протифлатерні характеристики. У випадку збільшення жорсткості опори кріплення у 6 разів, рульовий привод не здатен до дисипації енергії флатерних коливань, оскільки зусилля вже не може випереджати за фазою переміщення вихідної ланки (рисунок 2).

Це пояснюється тим, що при досить жорсткості опори кріплення рульового привода зменшується деформація опори кріплення і зникає додатковий зворотній зв'язок за зусиллям золотникового розподільника.



a



б

Рисунок 2 – Динамічні характеристики рульового привода з оберненою кінематикою; $C_0=90 \cdot 10^7$ Н/м; а – амплітудні і фазові частотні характеристики для привода з розімкнутим контуром; б – амплітудні і фазові частотні характеристики динамічної жорсткості

Висновки

1. При збільшенні жорсткості опори кріплення рульового привода, зменшуються запаси стійкості за амплітудою.
2. Зростання жорсткості опори кріплення в 2 рази призводить до зростання запасів стійкості за фазою в межах 2%–5%.
3. Зростання жорсткості опори кріплення рульового привода має певні межі після яких привод із оберненою кінематикою втрачає свої протифлатерні властивості.

Список використаних джерел

1. Micheli B., Neumann J., Arnold J. Design of flutter suppression controllers for a wing in compressible flow based on high-fidelity aerodynamics // International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics (IFASD 2024), 17–21 June 2024, The Hague, The Netherlands.
2. Абрамов Е.І., Зайончковський Г.Й. Гідравлічні слідкуючі приводи систем керування літальних апаратів. Київ: КМУЦА, 2000. 224 с.
3. Бочаров В.П., Глазков М.М., Зайончковський Г.Й., Тарасенко Т.В., Трофімов В.А. Гідравліка та гідропневмопристрої авіаційної техніки: навч. посіб. Київ: НАУ, 2011. 472 с.