

Вплив зміни тиску гідравлічної системи на динамічні характеристики гідравлічного привода

Р.О. Єременко¹

Received: 30 April 2024 / Revised: 27 May 2024 / Accepted: 4 June 2024

Анотація. Об'єктом дослідження є динамічні характеристики гідравлічного привода системи керування літального апарата. З метою покращення стійкості та керованості літальних апаратів існує необхідність визначення закономірності зміни динамічних параметрів привода (запаси по фазі та амплітуді, частоту та амплітуду резонансного піка тощо) залежно від зміни тиску нагнітання гідравлічної системи. В результаті виконання дослідження за наявною математичною моделлю отримано залежність динамічних параметрів гідравлічного привода заданої кінематичної схеми від тиску нагнітання. Встановлено, що зі збільшенням тиску нагнітання динамічні характеристики привода погіршуються: зменшуються запаси по фазі та амплітуді, збільшується пікова амплітуда резонансу і зменшується частота виникнення резонансу, проте для більш точної кількісної оцінки є необхідність у проведенні подальших досліджень з уточненою математичною моделлю. Отримані результати надалі можуть бути застосовані для оптимізації умов роботи приводів систем керування літальних апаратів, джерелом живлення котрих є насос постійної подачі, що працює в комплексі з гідравлічним акумулятором і гідромеханічним автоматом розвантаження.

Ключові слова: літальний апарат, система керування, гідравлічний привод, динамічні характеристики, експлуатація.

Вступ

Типові системи керування літальних апаратів (ЛА), окрім виконання безпосередньо траєкторного керування польотом, повинні забезпечувати також ряд функцій, пов'язаних зі стабілізацією ЛА в просторі, компенсацією зусиль змінних аеродинамічних навантажень, забезпечувати виконання програм автоматичного пілотування ЛА тощо. Виконання даних задач вимагає складних алгоритмів управління і високої позиційної точності органів керування ЛА, що забезпечується гідравлічними лінійними приводами, наявними у системах керування.

Певна частка літальних апаратів, котрі знаходяться в експлуатації, основним джерелом гідравлічної енергії мають шестеренні насоси постійної подачі, що працюють в парі з гідравлічними акумуляторами, котрі

мають перевагу в експлуатаційній та технологічній економічності. В гідравлічних системах даного типу робочий тиск підтримується в межах номінальних значень завдяки періодичній роботі автомата розвантаження насоса, що включає насос в роботу лише тоді, коли тиск в системі падає нижче за номінальний мінімум. Це дозволяє підвищити ресурс як гідравлічної системи в цілому, так і окремих її агрегатів.

Як приклад вищеописаної системи можна навести гідравлічну систему багатоцільового гелікоптера Мі-8 або Мі-17, що працює в межах номінального тиску від 4.4 до 6.9 МПа, є відносно малогабаритною та обслуговує чотири гідравлічні приводи системи керування загальним та циклічним кроком основного гвинта гелікоптера, а також кроком хвостового гвинта.

Шляхом сумісної роботи автомата розвантаження, гідроакумулятора та насоса тиск в системі періодично змінюється в межах від мінімального до максимального номінальних значень. Така особливість роботи системи створює специфічні умови експлуатації гідравлічних приводів системи керування і має безпосередній вплив як на їхні статичні, так і динамічні характеристики, що потребує кількісної оцінки.

✉ Р.О. Єременко
roal.yr@gmail.com

¹ Національний авіаційний університет, Київ, Україна

Результати проведення вищезазначених досліджень можуть бути впроваджені як модифікації в наявні системи керування літальних апаратів, що потенційно може покращити їхні характеристики траєкторного керування і мати позитивний вплив на умови експлуатації.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Динамічні характеристики є основними показниками стійкості та керованості гідравлічного привода. В системах керування ЛА від приводів вимагається необхідна швидкодія, здатність гасити зовнішні силові збурення і висока позиційна точність. Дотримання необхідних вимог забезпечується дослідженням динамічних характеристик даних приводів за допомогою методів теорії автоматичного керування та забезпеченням необхідних параметрів і законів керування цими системами.

У дослідженні [1] автори відзначають задовільну точність математичного моделювання для передавальної функції привода, досліджуваної у діапазоні низьких частот при сталому тиску в гідравлічній системі 6 МПа. Відзначено, що за частоти до 5 Гц відхилення від експериментальних даних є меншим за 10 %. Випадок змінного тиску в гідравлічній системі не досліджувався.

У дослідженні [2] автори розглядають гідравлічний привод, що працює у системі з насосом постійної подачі, але регуляція тиску відбувається шляхом застосування редукційного клапана з ПД-регулятором, котрий підтримує тиск в системі у необхідних межах (1.2–2.7 МПа). В даній постановці автори не розглядають сумісну роботу насоса постійної подачі в комплексі з гідравлічним акумулятором та гідромеханічним автоматом розвантаження насоса, котрий забезпечує циклічну зміну робочого тиску в системі.

У дослідженні [3] автори розглядають електрогідростатичний привод з об'ємним керуванням. Відзначається, що такі приводи мають незадовільні динамічні характеристики, що обмежує їхнє широке застосування у системах керування ЛА. Вирішальним фактором, що впливає на динамічні характеристики такої системи, є вихідна потужність електромотора і інерційність мотор-насосної групи. Це може вказувати на те, що гідравлічні приводи з дросельним регулюванням, котрі працюють від гідравлічних систем з насосами постійної подачі та гідроакумуляторами, мають ряд переваг у порівнянні з приводами з об'ємним регулюванням.

У дослідженні [4] автори розглядають гідравлічний привод із золотниковим регулюванням, який працює від гідравлічної системи з насосом постійної подачі, тиск в котрій регулюється за допомогою редукційного клапана, що працює в комплексі із запропонованим алгоритмом керування, мета якого – зменшити величину споживання енергії гідравлічною системою.

Відзначається значний вплив змінного робочого тиску на коефіцієнти лінійних рівнянь, що описують роботу системи, у зв'язку з чим неможливо визначити єдину робочу точку системи, тому розглядається їх ряд із подальшою лінеаризацією параметрів між ними. Відзначаються задовільні характеристики розглянутого гідравлічного привода. Проте, запропонована постановка не розглядає роботу насоса постійної подачі в комплексі з гідравлічним акумулятором та гідромеханічним автоматом розвантаження насоса, котрий забезпечує циклічну зміну робочого тиску в системі.

У дослідженні [5] автори вказують на вплив окремих конструкційних та експлуатаційних факторів на загальну жорсткість гідравлічного привода при різних значеннях тиску в гідравлічній системі. Це дослідження є важливим, адже жорсткість гідравлічного привода має вплив на його динамічні характеристики. Авторами запропонована нова модель жорсткості гідравлічного привода, а також наведені кількісні характеристики впливу окремих компонентів системи та робочої рідини на загальну жорсткість привода. Наведене дослідження не розглядає динамічні характеристики жорсткості гідравлічного привода, що в умовах привода системи керування ЛА є актуальним.

Аналізуючи літературні джерела, можна відзначити, що автори здебільшого досліджують динамічні характеристики приводів систем керування за умови незмінного робочого тиску нагнітання, або системи, в яких відсутні гідравлічні акумулятори та гідромеханічні автомати розвантаження насоса, наявність котрих обумовлює циклічну зміну тиску. Також значна частина досліджень, не розглянутих безпосередньо в даній роботі, спрямована на пошук перспективних альтернатив централізованим гідравлічним системам в рамках концепції більш електричного літака (MEA, More Electric Aircraft) [6], [7]. Відтак, досліджуються здебільшого електрогідростатичні приводи з об'ємним регулюванням.

Слід також зазначити, що значна кількість даних та досліджень, пов'язаних із системами керування ЛА, є закритими, або подаються лише у якісному вигляді [8], що змушує проводити певні дослідження самостійно.

Тому, з урахуванням вищезазначеного, існує необхідність проведення дослідження впливу зміни тиску гідравлічної системи на динамічні характеристики гідравлічних приводів систем керування ЛА.

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є визначення шляхом математичного моделювання впливу тиску гідравлічної системи на динамічні характеристики гідравлічного привода системи керування ЛА.

Згідно з поставленою метою, сформульовано наступні задачі дослідження:

1. Сформулювати передавальні функції гідравлічного привода та використати їх для побудови логарифмічних амплітудно-фазових частотних характеристик (ЛАФЧХ, також відомих як діаграми Боде) розімкненого та замкнутого контуру.

2. За ЛАФЧХ розімкненого контуру визначити запаси по фазі та амплітуді.

3. За ЛАФЧХ замкнутого контуру визначити частоту та амплітуду резонансу і смугу пропускання частот.

4. Дослідити стійкість системи за допомогою діаграми Найквіста.

5. Дослідити реакцію системи на східчастий вхідний сигнал для визначення перерегулювання, часу наростання та часу стабілізації.

6. Провести моделювання при різних величинах робочого тиску гідравлічної системи, для виявлення закономірностей між зміною тиску та зміною динамічних характеристик привода.

Сформульовані задачі дослідження дадуть можливість надалі визначити необхідні параметри для синтезу регулятора, завданням якого буде стабілізація динамічних характеристик гідравлічного привода в умовах циклічної зміни робочого тиску. На практиці це дозволить покращити стійкість і керованість ЛА, в системах керування котрих застосовується розглянутий тип привода.

Матеріали та методи дослідження

Дане дослідження в першому наближенні проводиться за допомогою математичного моделювання відповідно до рівнянь, визначених у [9], [10], що описують роботу гідравлічного привода під дією аеродинамічного навантаження. Як дослідний об'єкт розглядається привод з оберненою кінематикою, кінематична схема якого наведена на рис. 1. Система рівнянь (1), котра описує роботу гідравлічного привода під дією зовнішнього навантаження $R_{зовн}$, визначає передавальні функції (2) і (3) розімкненого та замкнутого контурів відповідно.

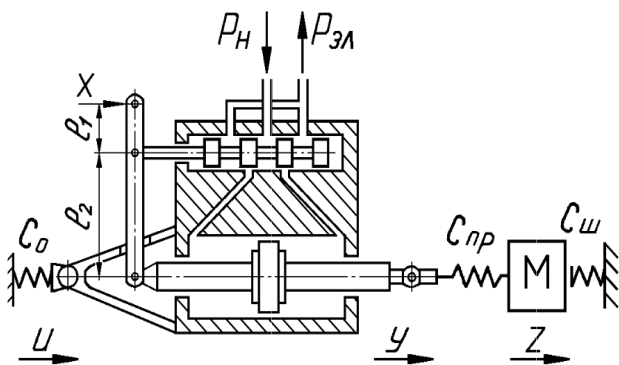


Рис. 1. Кінематична схема гідравлічного привода з оберненою кінематикою [9]

Система диференціальних рівнянь, що описує роботу привода має наступний вигляд:

$$\begin{cases} m\ddot{z} + h^e \dot{z} + C_{Ш}z - R_{зовн} = C_{ПР}(y - z) \\ m_1 \ddot{y} + k_B^e \dot{y}_1 + C_{ПР}(y - z) = Fp_{ДВ} \\ m_2 \ddot{u} - k_B^e \dot{y}_1 + C_O u = -Fp_{ДВ} \\ F\dot{y}_1 + k_C \dot{p}_{ДВ} + k_{ВИТ} p_{ДВ} = k_{Q\varepsilon} \varepsilon - k_{QP} p_{ДВ} \\ \varepsilon = k_{3.3} (k_{ПЕР} x_{ВХ} - y) + k_{Д.О} u \end{cases} \quad (1)$$

Передавальна функція розімкненого привода з урахуванням зовнішнього аеродинамічного навантаження має наступний вигляд:

$$W_{P.K}(S) = \frac{y(S)}{\varepsilon(S)} = \frac{D \left(\frac{m}{C_{ПР}} S^2 + \frac{h^e}{C_{ПР}} S + 1 \right)}{S \left(T_K^2 S^2 + 2T_K \xi_K S + 1 \right)} \quad (2)$$

Передавальна функція замкнутого зворотним зв'язком за положенням привода має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} W_{3.K}(S) &= \frac{y(S)}{x_{ВХ}(S)} = \\ &= \frac{D \cdot k_{неп}}{\frac{m}{C_{\Sigma}} S^3 + \left(\frac{h^e}{C_{\Sigma}} - \frac{m}{B} - \frac{D \cdot m}{C_{ПР}} + \frac{D \cdot m}{C_O} \frac{k_{Д.О}}{k_{3.3}} \right) S^2 + S + D} \end{aligned} \quad (3)$$

Дана постановка є спрощеною: приймається симетрія напірних та зливних крайок золотника, приймається середнє положення поршня відносно циліндра, приймається, що в системі відсутні люфти, приймається сталість коефіцієнта пружності робочої рідини в камерах гідроциліндра, приймається відсутність хвильових процесів в порожнинах циліндра, приймається незначущість сил, що діють у золотниковому розподільнику і нехтується їхній вплив на динаміку привода, приймається сталість робочого тиску гідросистеми [9].

Враховуючи спрощення, за яким тиск в системі приймається сталим, доцільним є розгляд динамічних характеристик системи за різних його значень, як окремих розрахункових випадків. Для цього задаємося рядом значень тиску $p_{наг} = 5, 10, 15, 20$ МПа, як таких, що є в межах типових значень, поширених в гідравлічних системах ЛА.

Основні вихідні параметри математичної моделі наведено у табл. 1. Параметри, котрі не вказані в табл. 1, беруться відповідно до загальних рекомендацій з розрахунку гідравлічних приводів систем керування літальних апаратів.

Математичне моделювання та отримання чисельних результатів і графіків забезпечується програмним середовищем з відкритим вихідним кодом Octave версії 6.2.0, мова програмування котрого має взаємну сумісність з MATLAB.

Таблиця 1. Деякі вихідні параметри математичної моделі

Параметр	Позначення	Величина
Тиск нагнітання, МПа	$p_{\text{наг}}$	5, 10, 15, 20
Зусилля на вихідній ланці, кН	R	160
Максимальна швидкість руху штока, м/с	V_{max}	0.08
Робочий хід штока, м	$U_{\text{роб}}$	0.058
Коефіцієнт деформації опори кріплення привода	$k_{\text{ДО}}$	1
Коефіцієнт зворотного зв'язку	$k_{\text{ЗЗ}}$	0.5
Коефіцієнт передачі	$k_{\text{пер}}$	-1

Результати дослідження динамічних характеристик гідравлічного привода при різних значеннях тиску гідравлічної системи

За передавальною функцією розімкненого контуру системи (2) побудовано логарифмічну амплітудно-фазову частотну характеристику, представлену на рис. 2 а. При збільшенні тиску нагнітання $p_{\text{наг}}$ спостерігається зменшення величини запасу по амплітуді $L(j\omega)_{\text{зап}}$, також значною мірою зменшується частота

фазового перетину $\omega_{\text{фп}}$, за котрою визначається запас по амплітуді.

При збільшенні тиску нагнітання $p_{\text{наг}}$ зменшується величина запасу по фазі розімкненого контуру системи $\phi_{\text{зап}}$, проте певною мірою зростає частота зрізу $\omega_{\text{зр}}$, за котрою визначають запас по фазі.

За передавальною функцією замкненого зворотним зв'язком за положенням контуру (3) побудовано логарифмічну амплітудно-фазову частотну характеристику, представлену на рис. 2 б. При збільшенні тиску нагнітання $p_{\text{наг}}$ спостерігається збільшення амплітуди резонансу системи $L(j\omega)_{\text{рез}}$, а також зменшення частоти виникнення резонансного піка $\omega_{\text{рез}}$. Смуга пропускання частот замкненого контуру $\omega_{\text{сп}}$ натомість збільшується.

Вищевказані залежності продемонстровано на рис. 3.

Побудовані діаграми Найквіста, представлені на рис. 4, за частотним відкликом передавальної функції розімкненого контуру (2) дозволяють оцінити стабільність системи при різних значеннях тиску нагнітання. Жодна крива не обходить критичну точку $(-1, j0)$, що свідчить про стабільність системи при всіх розглянутих значеннях тиску нагнітання $p_{\text{наг}}$.

При східчастому вхідному сигналі, представленому на рис. 5, збільшується величина перерегулювання y_{max} , але зменшується час наростання $T_{\text{нар}}$. Час згасання коливаль залишається майже незмінним при розглянутих значеннях тиску нагнітання $p_{\text{наг}}$.

Характерним показником погіршення динамічних характеристик досліджуваної моделі привода є зменшення величини гідравлічної жорсткості $S_{\text{гід}}$ в порожнинах гідроциліндра зі збільшенням тиску нагнітання $p_{\text{наг}}$, що відповідає попередньо отриманим результатам [9], [10]. Це продемонстровано на рис. 6.

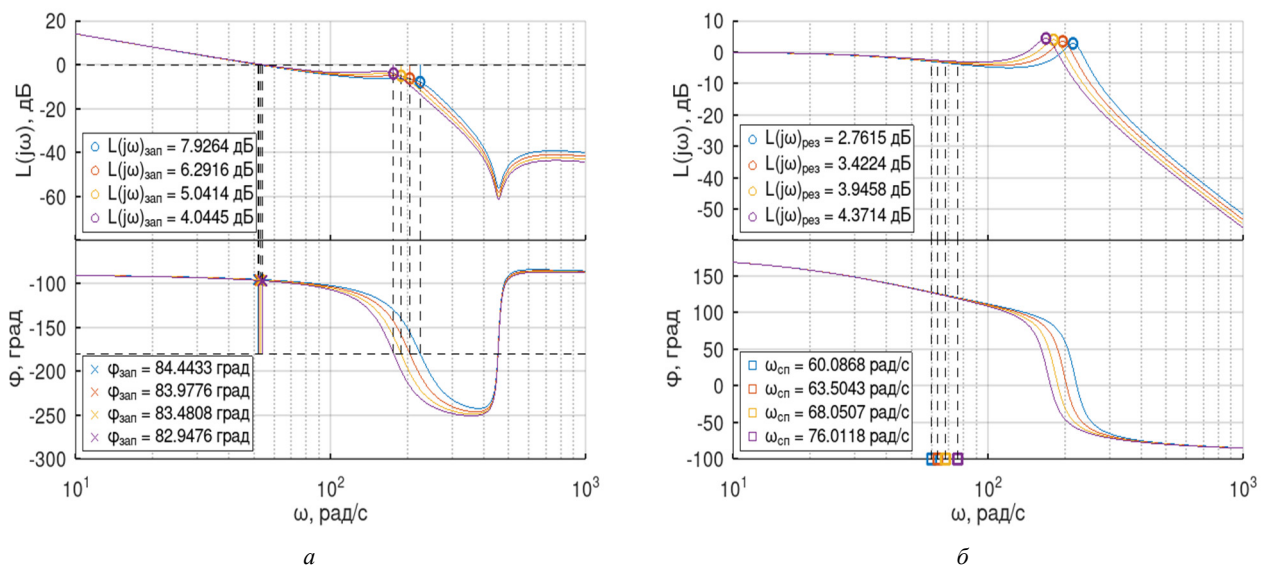


Рис. 2. Логарифмічні амплітудно-фазові частотні характеристики: (а) – розімкненого контуру, (б) – замкненого контуру

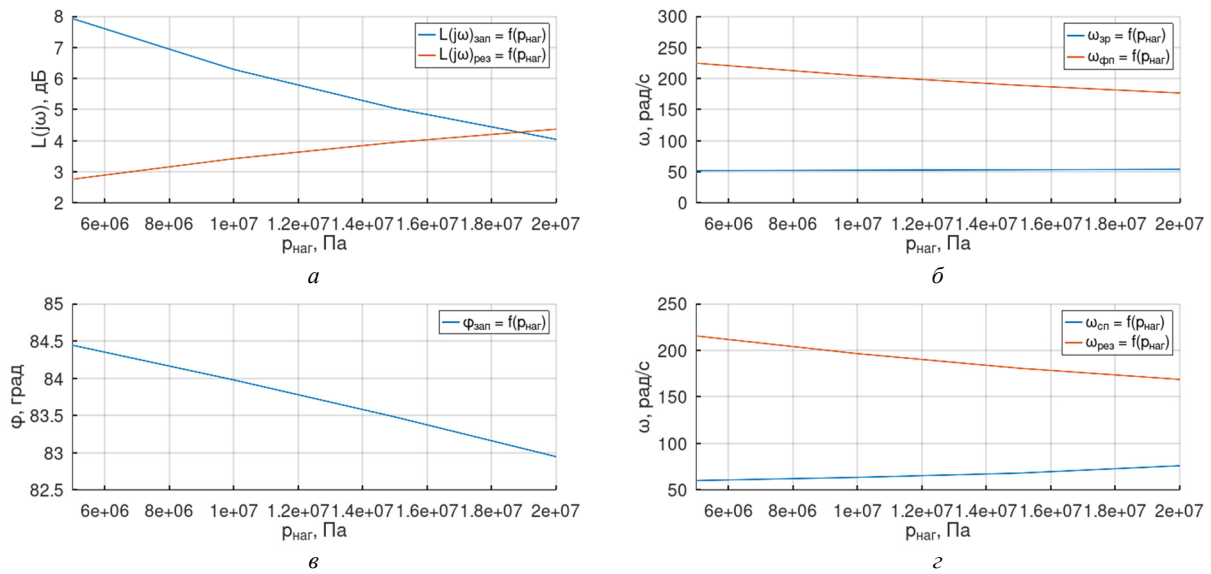


Рис. 3. Зміна динамічних характеристик привода залежно від тиску нагнітання: (а) – зміна запасу по амплітуді та амплітуди резонансу, (б) – зміна частоти зрізу та частоти фазового перетину, (в) – зміна запасу по фазі, (г) – зміна смуги пропускання частот та частоти резонансу

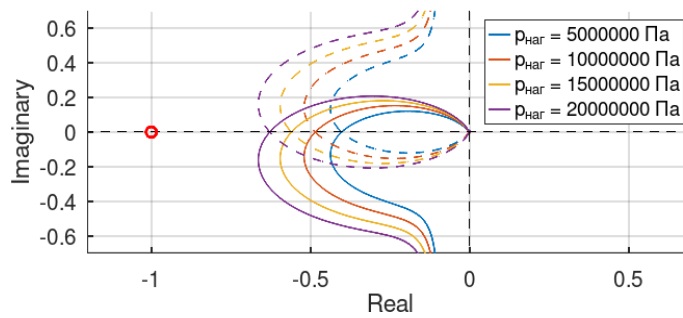


Рис. 4. Діаграма Найквіста розімкненого контуру

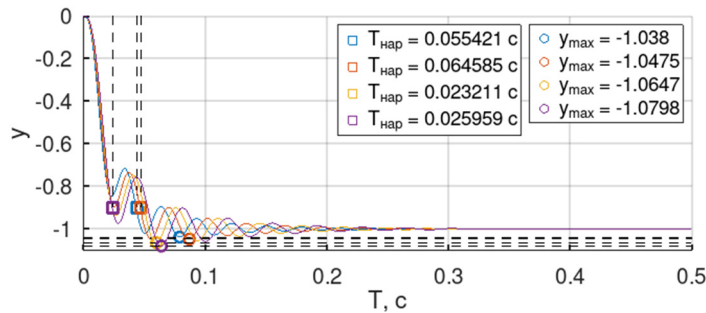


Рис. 5. Реакція системи на одиничний східчастий сигнал

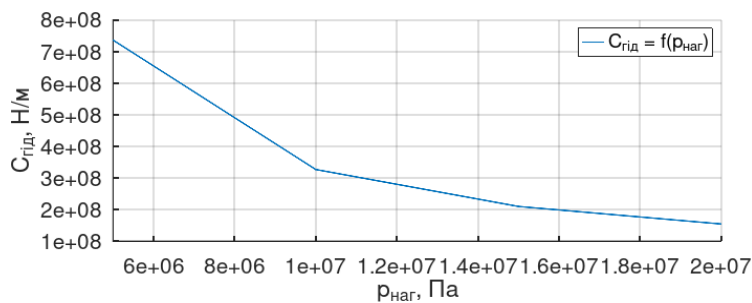


Рис. 6. Зміна величини гідравлічної жорсткості в порожнинах гідроциліндра залежно від тиску нагнітання

Обговорення

З урахуванням спрощень, наведених у математичній моделі [9], а також результатів досліджень [1], доречним є зауважити, що точність отриманих результатів може бути не достатньою, і кількісна оцінка точності потребуватиме верифікації за допомогою експерименту. Однак, з урахуванням чутливості стійкості та керованості ЛА до динаміки гідравлічних приводів системи керування, у моделюванні динамічних характеристик залишається доцільним прагнути отримати якомога кращі показники, наприклад, більші запаси по амплітуді та фазі, меншу амплітуду резонансу тощо.

Окремо слід відзначити необхідність дослідження впливу зміни тиску на динамічну жорсткість гідравлічного привода. Попередні результати моделювання відповідно до моделі [9] зазначено у дослідженні [11]. Відмічено, що зі збільшенням тиску нагнітання $p_{\text{наг}}$, зменшуються амплітудні компоненти статичної та динамічної жорсткості гідравлічного привода, що також може негативно впливати на його динаміку.

Аналізуючи реакцію системи на вхідний східчастий сигнал і враховуючи спрощеність розглянутої постановки, доцільним буде проведення дослідження, метою якого буде визначення роботи гідравлічного привода в часі під навантаженням за умови циклічно змінного тиску. Введення регулятора в контур управління приводом є типовим шляхом покращення його динамічних характеристик, що підтверджується авторами розглянутих робіт. Враховуючи специфіку експлуатації дослідного гідравлічного привода, а також наявні напрацювання, розробка та введення в контур регулятора може значною мірою покращити як його динамічні характеристики, так і умови його експлуатації.

References

- [1] V. Forental, M. Forental, and F. Nazarov, "Investigation of dynamic characteristics of the hydraulic drive with proportional control," *Procedia Engineering*, Vol. 129, pp. 695–701, 2015, doi: [10.1016/j.proeng.2015.12.093](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.093).
- [2] R. Nourizadeh, S. M. Rezaei, M. Zareinejad, K. Baghestan, A. Tivay and M. Saadat, "Robust hydraulic actuator force control through relief discharge," in *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 229, No. 4, pp. 308–318, 2015, doi: [10.1177/0959651814564480](https://doi.org/10.1177/0959651814564480).
- [3] L. Zhihui, Y. Shang, J. Zongxia, L. Yan, W. Shuai and L. Xiaobin, "Analysis of the dynamic performance of an electro-hydrostatic actuator and improvement methods," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 31, No. 12, pp. 2312–2320, 2018, doi: [10.1016/j.cja.2018.03.014](https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.03.014).
- [4] M. Bahrami, A. Tivay, K. Baghestan, S. Rezaei and M. Zareinejad, "An energy-saving robust motion control of redundant electro-hydraulic servo systems," in *2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, IEEE, 2016, pp. 459–464, doi: [10.1109/ICROM.2016.7886784](https://doi.org/10.1109/ICROM.2016.7886784).
- [5] H. Feng, Q. Du, Y. Huang and Y. Chi, "Modelling Study on Stiffness Characteristics of Hydraulic Cylinder under Multi-Factors," *Journal of Mechanical Engineering / Strojniški Vestnik*, Vol. 63, 2017, doi: [10.5545/sv-jme.2017.4313](https://doi.org/10.5545/sv-jme.2017.4313).
- [6] R. O. Yeremenko and V. M. Badakh, "Perspektyvy rozvytku system peredachi potuzhnosti aviatsiinoi tekhniki," in *Proc. Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia "Perspektyvy rozvytku mashynobuduvannia transport – 2019," Vinnytsia: PE "TD Edelweiss i K", 2019, pp. 276–278.*

Висновки

Шляхом математичного моделювання було досліджено вплив зміни тиску нагнітання на динамічні характеристики гідравлічного привода системи керування літального апарата.

Встановлено, що запаси по амплітуді та фазі розімкненого контуру гідравлічного привода зменшуються зі збільшенням тиску нагнітання, при цьому частота зрізу збільшується, а частота фазового перетину зменшується.

Встановлено, що зі збільшенням тиску нагнітання збільшується амплітуда резонансу замкненого контуру гідравлічного привода, а також зменшується частота резонансного піка. При цьому певною мірою збільшується ширина смуги пропускання частот замкненого контуру.

Встановлено, що при розглянутих значеннях тиску нагнітання система залишається стабільною відповідно до критерію Найквіста.

Отримано реакцію системи на східчастий вхідний сигнал, за яким можна відмітити зменшення часу наростання та збільшення перерегулювання зі збільшенням тиску нагнітання.

Отримані результати потребують додаткової верифікації експериментально, адже в математичній моделі закладено значну кількість спрощень і не враховується циклічна зміна тиску нагнітання. Проте, за отриманими результатами можна зробити висновок про погіршення динамічних характеристик гідравлічного привода системи керування літального апарата зі збільшенням тиску нагнітання в гідравлічній системі, адже це зменшує гідравлічну жорсткість в порожнинах гідроциліндра, що підтверджується попередніми дослідженнями.

Існує потреба в додатковому дослідженні динамічних характеристик гідравлічного привода системи керування ЛА при циклічно змінному тиску нагнітання.

- [7] V. M. Badakh and R. O. Yeremenko, "Problema rozrobky perspektyvnoho elektrohidravlichnoho pryvodu bilsh elektrychnoho litaka," in *Proc. Hidroaeromekhanika v inzheneranii praktytsi*, no. 25, pp. 373–375, 2020.
- [8] R. Yeremenko and V. Badakh, "Public access data in aerospace industry," in *Science progress in European countries: new concepts and modern solutions: Papers of the 8th International Scientific Conference*, Stuttgart, Germany, Jul. 2019.
- [9] H. Zaionchkovskiy, "Vyznachennia zapasiv stiikosti ta protyflaternykh vlastyvostei hidravlichnykh slidkuaiuchykh rulovykh pryvodiv system keruvannia litakiv," *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI. Seriya: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia*, no. 1, pp. 99–109, 2014. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpient_2014_1_15.
- [10] H. Zaionchkovskiy, "Otsinka dynamichnykh i protyflaternykh vlastyvostei hidromekhanichnykh slidkuaiuchykh rulovykh pryvodiv system keruvannia litakiv," *Promyslova hidravlika i pnevmatyka*, No. 2, pp. 67–77, 2013. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/inhpn_2013_4_11.
- [11] R. Yeremenko, "Vplyv zminy tysku nahnyttannia na dynamichnu zhorstkist hidravlichnoho pryvodu," in *Proc. XXIV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh "POLIT. Challenges of science today"*, Kyiv: NAU, 2024.

The Impact of Hydraulic System Pressure Changes on the Dynamic Properties of a Hydraulic Actuator

R. Yeremenko¹

¹ National aviation university, Kyiv, Ukraine

Abstract. The object of the study is the dynamic properties of the hydraulic actuator of the aircraft control system. In order to improve the stability and controllability of an aircraft, it is necessary to determine the regularity of changes in the dynamic parameters of the actuator (phase and amplitude margins, resonant peak frequency and amplitude, etc.) depending on changes in the pressure of the hydraulic system. As a result of the study performed using the available mathematical model, the dependence of the dynamic parameters of the hydraulic actuator of the specified kinematic scheme on the supply pressure was obtained. It was found that with an increase in supply pressure, the dynamic parameters of the actuator deteriorate: phase and amplitude margins decrease, peak resonance amplitude increases, and resonance frequency decreases. However, for a more accurate quantitative assessment, further research with a refined mathematical model is necessary. The obtained results can be applied in the future to optimize the operating conditions of actuators for aircraft control systems, the power source of which is a constant delivery pump working in conjunction with a hydraulic accumulator and a hydro-mechanical pump unloading mechanism.

Keywords: aircraft, control system, hydraulic actuator, dynamic parameters, operation.