

УДК 681.527.34:519.876.2

doi: 10.32620/aktt.2023.4sup1.11

Чан Мань ХУНГ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК

У статті об'єктом дослідження є два основні вузли агрегату AP20H – електрогідролічний підсилювач (ЕГП) і силовий циліндр (СЦ). Виявлення виникнення та розвитку несправностей у них розглядаються на основі ідентифікації параметрів розроблених математичних моделей. Основні **цілі дослідження**: ідентифікація параметрів математичних моделей ЕГП і СЦ з використанням різних кроків квантування часу, визначення оптимального кроку квантування часу для чисельного інтегрування диференціальних рівнянь; визначення діагностичних ознак, які найбільш ймовірно впливають на роботу вузлів агрегату при появі різних несправностей. Для досягнення поставлених цілей були вирішені наступні **завдання**: розроблені математичні моделі ЕГП, СЦ і імітаційна модель дослідження агрегату на випробувальному стенді; виконана ідентифікація параметрів математичних моделей ЕГП і СЦ методом найменших квадратів (МНК); визначено допустимий крок квантування часу; визначені верхні і нижні допустимі межі параметрів, що ідентифікуються, для справного агрегату; розроблена методика визначення діагностичних ознак, що найбільш ймовірно визначають виникаючі несправності агрегату. Для цього використовуються **методи**: аналітичні, чисельні, статистичні, теорія гідролічних систем і теорія ідентифікації систем. Отримані наступні **результати**: диференціальні рівняння, що описують переміщення розподільчого золотника (РЗ) ЕГП і вихідної ланки (ВЛ) СЦ; алгоритми ідентифікації параметрів математичних моделей по МНК; визначений допустимий крок квантування часу; розроблена методика визначення діагностичних ознак за допомогою діагностичної карти Шухарта для параметрів математичних моделей. **Наукова і практична новизна** отриманих результатів полягає в наступному: розроблені математичні моделі ЕГП і СЦ агрегату; розроблена імітаційна модель агрегату на випробувальному стенді; здійснена імітація різних несправностей вузлів агрегату і виконана ідентифікація параметрів математичних моделей цих вузлів; отримані зміни оцінок параметрів математичних моделей ЕГП і СЦ в залежності від зміни кожного впливаючого фактора; визначені верхні і нижні допустимі межі параметрів і середні значення цих параметрів; визначені діагностичні ознаки, які найбільш ймовірно впливають на роботу агрегату. Показано, що крок квантування часу $\Delta t = 0,01$ (с) забезпечує визначення переміщень РЗ і ВЛ з погрешностями $1,914 \cdot 10^{-6}$ мм і $2,157 \cdot 10^{-5}$ мм.

Ключові слова: агрегат; електрогідролічний підсилювач; силовий циліндр; ідентифікація параметрів; математична модель; діагностична ознака; імітаційна модель.

Вступ

Діагностування технічного стану агрегату – це процес виявлення дефектів і несправностей, які можуть виникнути в процесі роботи агрегату на ранній стадії їх виникнення. Тим самим підвищується надійність, ресурс і стабільність роботи агрегату. Причина таких несправностей може виходити від внутрішніх вузлів агрегату або зовнішніх впливів, таких як: зміна температури навколишнього середовища; зовнішні сили, що перевищують допустиму межу; недотримання технічних умов експлуатації тощо. Діагностування передбачає визначення технічного стану систем без їх розбирання та виявлення несправностей [1, 2].

Одним із підходів до діагностування технічного стану є використання спеціально розроблених математичних моделей, що описують поведінку діа-

гностованого агрегату, або його складових вузлів. [2–4]. Потім за допомогою методу ідентифікації визначають поточні значення параметрів цих математичних моделей. Відхилення значень параметрів від номінальних (або допустимих) містить інформацію про виникнення та розвиток несправностей і дозволяє визначити найбільш ймовірну причину (фактор) несправності. Тому математичні моделі повинні з високою точністю описувати вихідний процес, щоб зменшити ймовірність помилкової діагностики [1].

У статті об'єктом дослідження є два основні вузли агрегату рульового AP20H – електрогідролічний підсилювач (ЕГП) і силовий циліндр (СЦ). Виявлення виникнення та розвитку несправностей у них розглядаються на основі ідентифікації коефіцієнтів розроблених математичних моделей ЕГП і СЦ.

Агрегат AP20H представляє собою пристрій зі складною внутрішньою структурою гідросистеми з безліччю каналів рідини під високим тиском. Він встановлюється у хвостовій частині літака і використовує зворотно-поступальний поршневий механізм для відхилення керма напрямку за керуючим електричним сигналом, що формується системою штурвального керування.

Агрегат працює тільки у польоті, тому у перервах між польотами літака можна виконувати ідентифікацію його параметрів за допомогою методу найменших квадратів (МНК) [5, 6].

За допомогою імітаційної моделі агрегату у середовищі Matlab/Simulink (див. рис. 3) отримано наступні основні результати: розроблені математичні моделі двох основних вузлів агрегату (ЕГП і СЦ); виконана імітація різних несправностей цих вузлів на випробувальному стенді; виконана ідентифікація параметрів математичних моделей вузлів із використанням різних кроків квантування часу та визначено допустимий крок квантування часу; визначено фактори (діагностичні ознаки), які найбільш ймовірно впливають на зміну параметрів математичних моделей.

1. Цілі дослідження

У статті представлені дві основні цілі дослідження:

- на основі результатів, отриманих за допомогою імітаційної моделі агрегату у режимі керування, потрібно було виконати ідентифікацію параметрів математичної моделі з використанням різних кроків квантування часу інтегрування диференціальних рівнянь динаміки основних вузлів агрегату (ЕГП і СЦ) та визначити допустимий крок квантування часу;

- визначити фактори (діагностичні ознаки), які найбільш ймовірно впливають на зміну параметрів вузлів агрегату при імітації різних несправностей.

2. Постановка задачі

Імітаційна модель агрегату AP20H розроблена у середовищі Matlab/Simulink на основі рівнянь динаміки ЕГП і СЦ. У ній враховують похибки (шуми) датчиків переміщень, швидкостей і прискорень розподільного золотника ЕГП і вихідної ланки (штока) СЦ, перепади тиску робочої рідини у СЦ, спричинені зміною сигналу керуючого електричного струму.

Імітаційна модель агрегату AP20H дозволяє описати з достатньою точністю зміну параметрів при роботі агрегату у режимі керування. У цьому режимі вихідна ланка (ВЛ) виконує повний хід переміщення (± 53 мм). Сила, створювана на ВЛ про-

порційна переміщенню, і досягає необхідного максимального значення (60 кН) у двох крайніх точках. Модель дозволяє виконувати імітацію несправностей агрегату (за рахунок зміни коефіцієнта тертя, коефіцієнта витоку рідини, коефіцієнта жорсткості навантаження або пружини тощо) для подальшої ідентифікації параметрів математичної моделі агрегату.

Для досягнення поставлених цілей дослідження у статті були вирішені наступні завдання:

- розроблені математичні моделі двох основних вузлів агрегату (ЕГП і СЦ);
- розроблена імітаційна модель випробувань агрегату на стенді;
- за результатами цих випробувань за допомогою МНК виконана ідентифікація параметрів математичних моделей вузлів агрегату з використанням різних кроків квантування часу;
- визначено допустимий крок квантування часу чисельного інтегрування диференціальних рівнянь математичних моделей;
- визначені верхні та нижні допустимі межі ідентифікуємих параметрів для справного агрегату;
- розроблена методика визначення факторів (діагностичних ознак), які найбільш ймовірно визначають виникаючі несправності.

3. Математична модель вузлів агрегату та його імітаційна модель випробувань на стенді

Гідравлічні схеми ЕГП і СЦ наведено на рис. 1 та 2. На рис. 3 і 4 показані імітаційна модель агрегату у середовищі Matlab/Simulink та схема випробувального стенду.

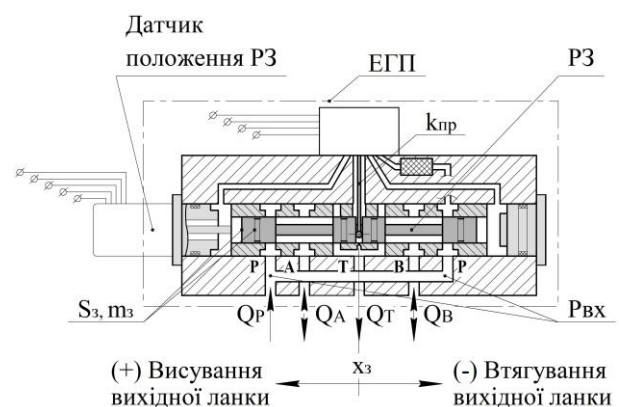


Рис. 1. Гідравлічна схема ЕГП

3.1. Математична модель ЕГП

Математична модель ЕГП розроблена на основі рівноваги сил, що діють на розподільний золотник

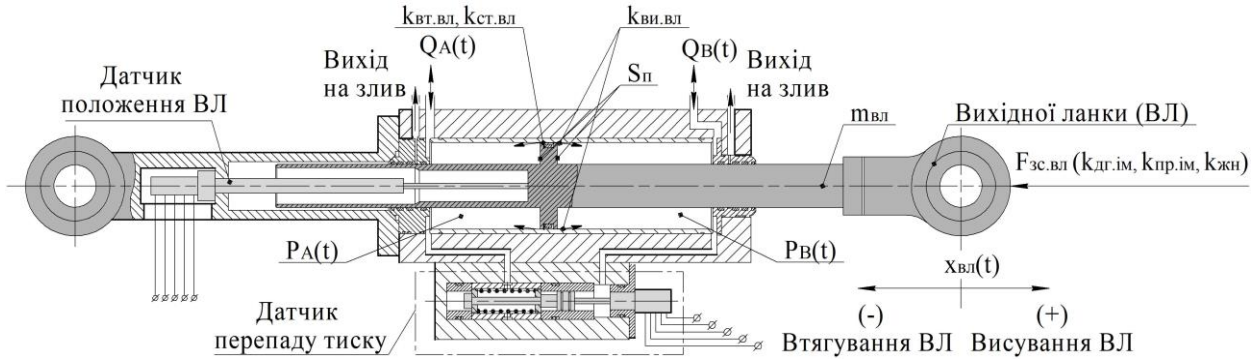


Рис. 2. Гідрравлічна схема СЦ

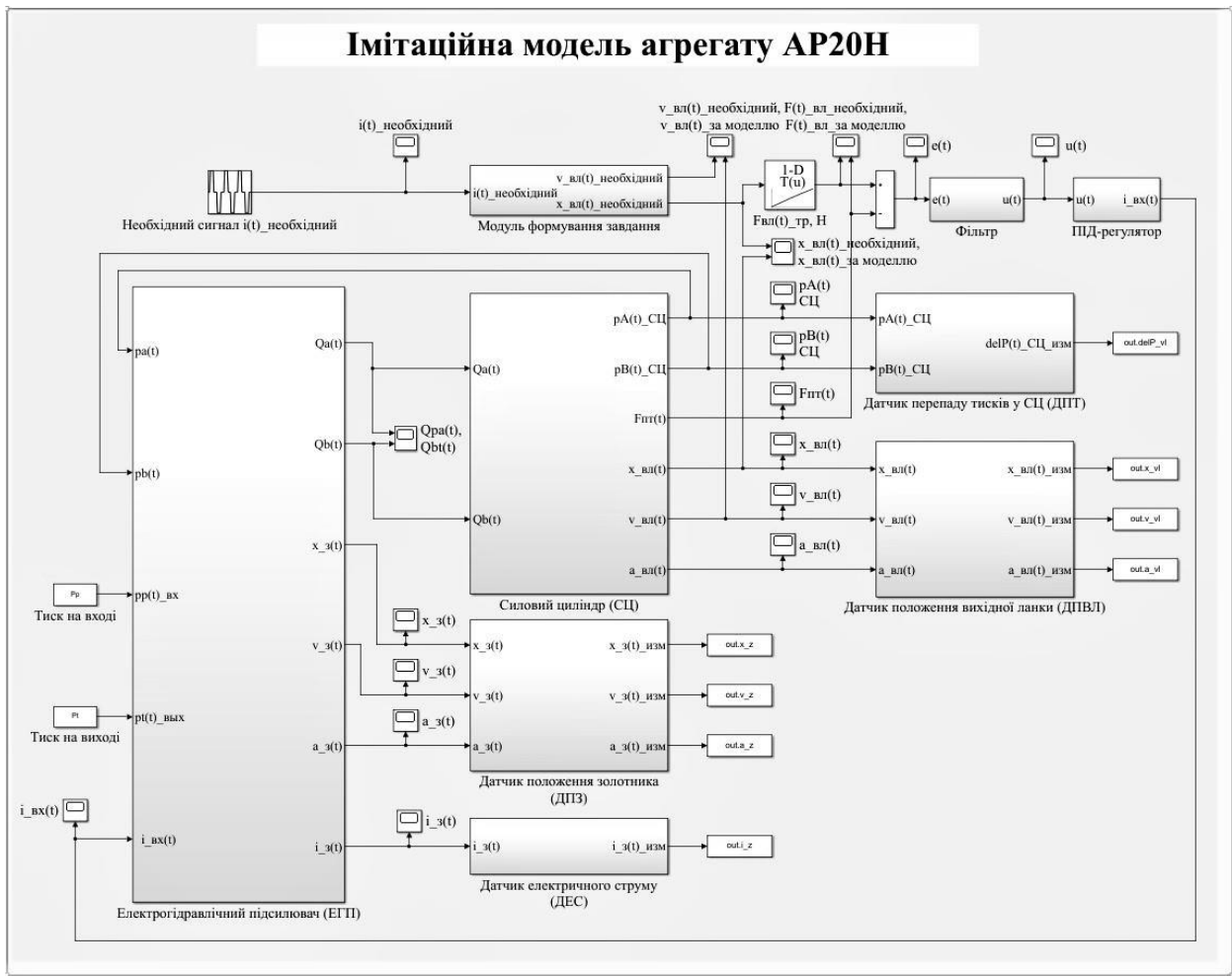


Рис. 3. Імітаційна модель агрегату AP20H у середовищі Matlab/Simulink

(P3) при його переміщенні, у вигляді диференціального рівняння [7-9]:

$$m_3 \cdot \ddot{x}_3(t) = S_3 \cdot k_{пт.з} \cdot i(t) - k_{вт.з} \cdot \frac{\eta \cdot l \cdot \pi \cdot d_3}{\delta} \cdot \dot{x}_3(t) - k_{ст.з} \cdot x_3(t) - k_{пр} \cdot x_3(t), \quad (1)$$

де $\ddot{x}_3(t)$ – прискорення P3, м/с²;

$\dot{x}_3(t)$ – швидкість P3, м/с;

$x_3(t)$ – переміщення P3, м;

m_3 – маса P3, кг;

S_3 – робоча площа торця P3, м²;

$i(t)$ – сигнал керуючого електричного струму, А;

d_3 – діаметр торця P3, м;

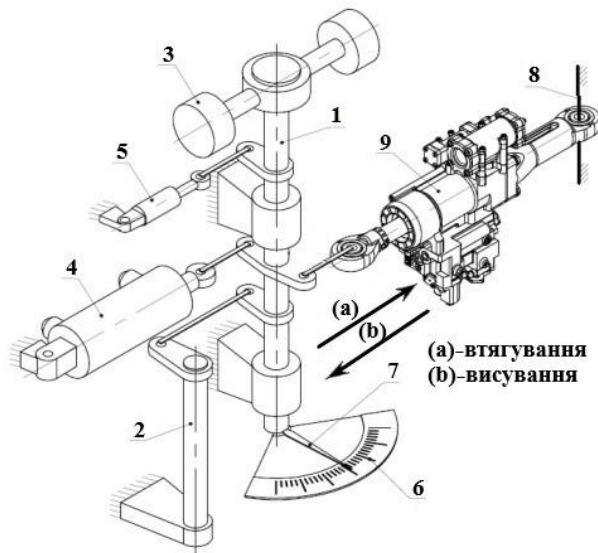


Рис. 4. Схема випробувального стенду

δ – зазор між поверхнею РЗ і поверхнею втулки, м;

l – довжина зазору, м;

η – динамічна в'язкість, Па·с ($\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$);

$k_{\text{вт.з}}$ – коефіцієнт в'язкого тертя, $\text{Н}/\text{м} \cdot \text{с}$;

$k_{\text{ст.з}}$ – коефіцієнт сухого тертя, $\text{Н}/\text{м}$;

$k_{\text{пр}}$ – коефіцієнт жорсткості «плоскої механічної пружини зворотного зв'язку», $\text{Н}/\text{м}$;

$k_{\text{пт.з}}$ – коефіцієнт посилення пропорційності між перепадом тисків у обох торцях РЗ $\Delta p_{\text{пд.з}}(t)$ і сигналом $i(t)$, $\text{Па}/\text{А}$.

Рівняння (1) представлено у такому вигляді:

$$\ddot{x}_3(t) = \frac{S_3 \cdot k_{\text{пт.з}}}{m_3} \cdot i(t) - \frac{k_{\text{вт.з}} \cdot \eta \cdot l \cdot \pi \cdot d_3}{m_3 \cdot \delta} \cdot \dot{x}_3(t) - \frac{k_{\text{ст.з}} + k_{\text{пр}}}{m_3} \cdot x_3(t), \quad (2)$$

$$\ddot{x}_3(t) = a_1 \cdot i(t) + a_2 \cdot \dot{x}_3(t) + a_3 \cdot x_3(t), \quad (3)$$

$$\text{де } a_1 = \frac{S_3 \cdot k_{\text{пт.з}}}{m_3}; a_2 = -\frac{k_{\text{вт.з}} \cdot \eta \cdot l \cdot \pi \cdot d_3}{\delta \cdot m_3};$$

$$a_3 = -\frac{k_{\text{ст.з}} + k_{\text{пр}}}{m_3}.$$

3.2. Математична модель СЦ

Математична модель СЦ розроблена на основі рівноваги сил, що діють на вихідну ланку (ВЛ) при

його переміщенні, у вигляді диференціального рівняння [7-9]:

$$(m_{\text{вл}} + m_{\text{н}}) \cdot \ddot{x}_{\text{вл}}(t) = S_{\text{п}} \cdot k_{\text{пт.сц}} \cdot \Delta p(t) - k_{\text{ст.вл}} \cdot x_{\text{вл}}(t) - k_{\text{вт.вл}} \cdot \dot{x}_{\text{вл}}(t) - (4) \\ - k_{\text{дг.ім}} \cdot \dot{x}_{\text{вл}}(t) - k_{\text{пр.ім}} \cdot x_{\text{вл}}(t) - k_{\text{жн}} \cdot x_{\text{вл}}(t),$$

де $\ddot{x}_{\text{вл}}(t)$ – прискорення ВЛ, $\text{м}/\text{с}^2$;

$\dot{x}_{\text{вл}}(t)$ – швидкість ВЛ, $\text{м}/\text{с}$;

$x_{\text{вл}}(t)$ – переміщення ВЛ, м;

$m_{\text{вл}}$ – сумарна маса поршня і штока ВЛ, кг;

$m_{\text{н}}$ – маса інерційного навантаження, кг;

$S_{\text{п}}$ – робоча площа поршня ВЛ, м^2 ;

$\Delta p(t)$ – перепад тисків рідини, Па;

$k_{\text{ст.вл}}$ – коефіцієнт сухого тертя, $\text{Н}/\text{м}$;

$k_{\text{вт.вл}}$ – коефіцієнт в'язкого тертя, $\frac{\text{Н}}{\text{м}/\text{с}}$;

$k_{\text{дг.ім}}$ – коефіцієнт демпфірування гідроциліндра (імітатор постійного навантаження), $\frac{\text{Н}}{\text{м}/\text{с}}$;

$k_{\text{пр.ім}}$ – коефіцієнт пружності імітатора пропорційного навантаження, $\text{Н}/\text{м}$;

$k_{\text{жн}}$ – коефіцієнт жорсткості навантаження, $\text{Н}/\text{м}$;

$k_{\text{пт.сц}}$ – коефіцієнт посилення пропорційності між перепадом тисків рідини у порожнинах СЦ за наявності факторів, що викликають зміну тиску рідини, і за відсутності таких факторів.

Рівняння (4) перетворено наступним чином:

$$\ddot{x}_{\text{вл}}(t) = \frac{S_{\text{п}} \cdot k_{\text{пт.сц}}}{(m_{\text{вл}} + m_{\text{н}})} \cdot \Delta p(t) - \frac{k_{\text{вт.вл}} + k_{\text{дг.ім}}}{(m_{\text{вл}} + m_{\text{н}})} \cdot \dot{x}_{\text{вл}}(t) - (5) \\ - \frac{k_{\text{ст.вл}} + k_{\text{пр.ім}} + k_{\text{жн}}}{(m_{\text{вл}} + m_{\text{н}})} \cdot x_{\text{вл}}(t);$$

$$\ddot{x}_{\text{вл}}(t) = b_1 \cdot \Delta p(t) + b_2 \cdot \dot{x}_{\text{вл}}(t) + b_3 \cdot x_{\text{вл}}(t), \quad (6)$$

де $m_{\text{с}} = m_{\text{вл}} + m_{\text{н}}$;

$k_{\text{в.д.}} = k_{\text{вт.вл}} + k_{\text{дг.ім}}$;

$k_{\text{с.п.ж.}} = k_{\text{ст.вл}} + k_{\text{пр.ім}} + k_{\text{жн}}$;

$$b_1 = \frac{S_{\text{п}} \cdot k_{\text{пт.сц}}}{m_{\text{с}}}; b_2 = -\frac{k_{\text{в.д.}}}{m_{\text{с}}}; b_3 = -\frac{k_{\text{с.п.ж.}}}{m_{\text{с}}}.$$

3.3. Імітаційна модель агрегату та схема випробувального стенду

Дослідження виконано імітацій випробувань агрегату на стенді. На рис. 4 вказана схема стенду, який передбачає проведення випробувань агрегату. На схемі прийняті наступні позначення: 1 – вал пристосування; 2 – імітатор пропорційного навантаження (торсіон); 3 – імітатор інерційного навантаження; 4 – імітатор постійного навантаження (гідроциліндр); 5 – технологічний датчик положення ВЛ; 6 – шкала; 7 – вказівна стрілка; 8 – нерухома вісь для кріплення підшипника кронштейна агрегату; 9 – випробовуваний агрегат.

Імітатор постійного навантаження (4) виконаний у вигляді гідроциліндра зворотно-поступальної дії (діє як демпфування), а імітатор пропорційного навантаження (2) виконаний у вигляді торсіону або плоских пружин.

4. Ідентифікація параметрів математичної моделі ЕГП і СЦ

Попередня ідентифікація параметрів математичної моделі ЕГП і СЦ здійснювалася за допомогою МНК на основі вимірювань вихідних сигналів датчиків ЕГП і СЦ у режимі керування з похибками, проведеними у табл. 1.

Таблиця 1

Датчики та їх похибки

Назва датчика	Основна похибка
Положення РЗ $x_3(t)$ BALLUFF BTL5_E10_V0050_P_S32	$\pm 100 \mu\text{м}$ ($\pm 0,01\%$)
Положення ВЛ $x_{\text{вл}}(t)$ BALLUF BTL5_E10_M0050_P_KA05	$\pm 100 \mu\text{м}$ ($\pm 0,01\%$)
Електричний струм $i(t)$ ДТХ-50	$\pm 1\%$
Тиск рідини $\Delta p(t)$ BALLUFF BSP B250_DV004_D06S1A_S4	$\pm 0,5\%$

Математична модель датчиків (рівняння спостереження) для ЕГП і СЦ має такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} y_i(t_k) \\ y_{x_3}(t_k) \\ y_{x_{\text{вл}}}(t_k) \\ y_{\Delta p}(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t_k) \\ x_3(t_k) \\ x_{\text{вл}}(t_k) \\ \Delta p(t_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_i(t_k) \\ \xi_{x_3}(t_k) \\ \xi_{x_{\text{вл}}}(t_k) \\ \xi_{\Delta p}(t_k) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де $\xi_i(t_k), \xi_{x_3}(t_k), \xi_{x_{\text{вл}}}(t_k), \xi_{\Delta p}(t_k)$ – похибки датчиків (нормально розподілені випадкові сигнали) з нульовими математичними очікуваннями $M\{\xi(t_k)\} = 0$;

$t_k = k \cdot \Delta t$ – моменти часу ($k = 1, 2, \dots, N$);

Δt – крок квантування часу.

Рівняння (3) і (6) у матричній формі запису:

$$X_3 = H_3 \cdot a, \quad (8)$$

де $X_3 = \begin{bmatrix} \ddot{x}_3(t_1) \\ \dots \\ \ddot{x}_3(t_N) \end{bmatrix};$

$$H_3 = \begin{bmatrix} i(t_1) & \dot{x}_3(t_1) & x_3(t_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ i(t_N) & \dot{x}_3(t_N) & x_3(t_N) \end{bmatrix}; a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}.$$

$$X_{\text{вл}} = H_{\text{вл}} \cdot b, \quad (9)$$

де $X_{\text{вл}} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{\text{вл}}(t_1) \\ \dots \\ \ddot{x}_{\text{вл}}(t_N) \end{bmatrix};$

$$H_{\text{вл}} = \begin{bmatrix} \Delta p(t_1) & \dot{x}_{\text{вл}}(t_1) & x_{\text{вл}}(t_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta p(t_N) & \dot{x}_{\text{вл}}(t_N) & x_{\text{вл}}(t_N) \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

Числові значення (оцінки) вектора параметрів a і b визначаються мінімізацією функції штрафу МНК:

$$J_{\text{МНК}}(a) = \frac{1}{2} (X_3 - H_3 \cdot a)^T (X_3 - H_3 \cdot a), \quad (10)$$

$$J_{\text{МНК}}(b) = \frac{1}{2} (X_{\text{вл}} - H_{\text{вл}} \cdot b)^T (X_{\text{вл}} - H_{\text{вл}} \cdot b). \quad (11)$$

З необхідних умов мінімуму функцій (10) і (11) отримують алгоритм ідентифікації векторів $\hat{a}_{\text{МНК}}$ та $\hat{b}_{\text{МНК}}$ (оцінок МНК) векторів параметрів a і b :

$$\hat{a}_{\text{МНК}} = (H_3^T \cdot H_3)^{-1} \cdot H_3^T \cdot X_3, \quad (12)$$

$$\hat{b}_{\text{МНК}} = (H_{\text{вл}}^T \cdot H_{\text{вл}})^{-1} \cdot H_{\text{вл}}^T \cdot X_{\text{вл}}. \quad (13)$$

Отримані оцінки параметрів математичної моделі ЕГП і СЦ за результатами виконання ідентифікації з використанням трьох кроків квантування часу $\Delta t = 0,1$ (с); $0,05$ (с) та $0,01$ (с). Вони наведені у табл. 2.

Таблиця 2
Оцінки параметрів моделі ЕГП і СЦ з різними кроками квантування часу Δt

$\Delta t, c$	$\hat{a}_{МНК}$	$\hat{b}_{МНК}$
0,1	$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 78,423 \\ -25,797 \\ -318,437 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,516E-07 \\ -28,368 \\ -305,838 \end{bmatrix}$
0,05	$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 79,488 \\ -26,177 \\ -322,755 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,657E-07 \\ -28,844 \\ -310,857 \end{bmatrix}$
0,01	$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 79,223 \\ -26,120 \\ -321,806 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,597E-07 \\ -28,595 \\ -308,777 \end{bmatrix}$

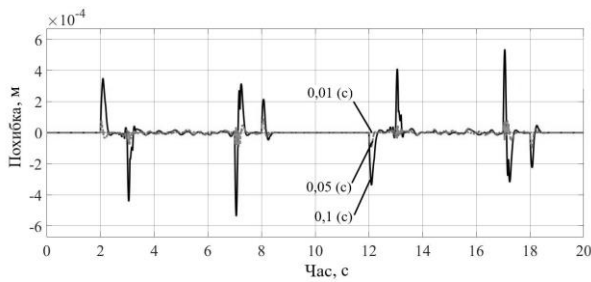


Рис. 5. Похибка визначення переміщення РЗ

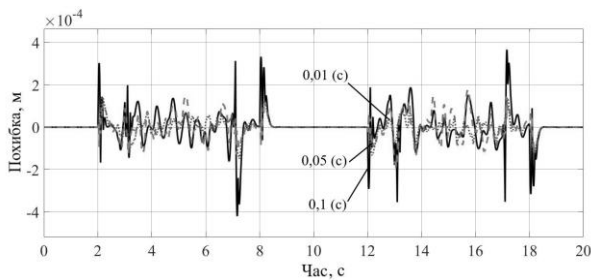


Рис. 6. Похибка визначення переміщення ВЛ

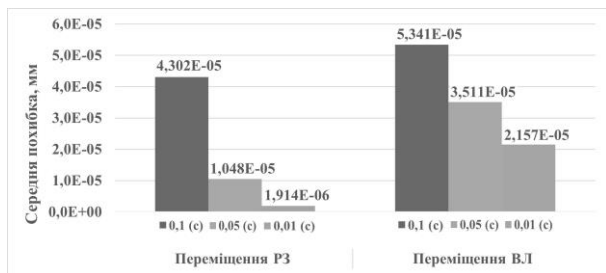


Рис. 7. Середні похибки визначення переміщень РЗ і ВЛ

Отримані значення вектора $\hat{a}_{МНК}$ та $\hat{b}_{МНК}$ були використані у математичній моделі ЕГП (3) і СЦ (8). Результати моделювання похибок визначення переміщень РЗ і ВЛ, обчислених за допомогою моделі, представлені на рис. 5 та 6.

Середні похибки визначення переміщень РЗ і ВЛ, обчислених за допомогою моделі з різними кроками Δt , наведені на рис. 7.

5. Визначення діагностичних ознак несправностей ЕГП і СЦ

Діагностування технічного стану агрегату з метою виявлення на ранній стадії можливих несправностей після кожного польоту літака.

В умовах імітації експериментальних досліджень агрегату на випробувальному стенді виконувалися випадкові зміни коефіцієнтів математичної моделі агрегату, що впливають на робочий процес. Ці коефіцієнти та їх початкові значення наведені у табл. 3.

Таблиця 3
Початкові значення коефіцієнтів впливають факторів

Параметр	Початкове значення	Параметр	Початкове значення
$k_{ПТ.З}$	45000	$k_{ДГ.ІМ}$	105000
$k_{СТ.З}$	10	$k_{ПР.ІМ}$	$1,132 \cdot 10^6$
$k_{ВТ.З}$	23	$k_{ЖН}$	1500
$k_{ПР}$	300	$k_{ВИ}$	10^{-11}
μ	0,7	η	0,018554
$k_{СТ.ВЗ}$	1000	E	$1,544 \cdot 10^9$
$k_{ВТ.ВЗ}$	150		

де $k_{ВИ}$ – коефіцієнт витoku у СЦ;
 μ – коефіцієнт витрати у ЕГП;
 E – об'ємний модуль пружності рідини.



Рис. 8. Випадкові значення коефіцієнтів

Для визначення діагностичних ознак, які можуть вплинути на зміну параметрів математичної моделі агрегату, реалізована наступна методика (див. рис. 9):



Рис. 9. Методика визначення діагностичних ознак

– значення коефіцієнтів, що впливають на роботу агрегату (див. табл. 3), змінюють випадковим чином у межах $\pm 0,5\%$ від початкового (або номінального) значення у M польотах (див. рис. 8). З них формують матрицю вхідних значень для імітаційної моделі агрегату AP20H;

– виконують моделювання роботи агрегату за допомогою імітаційної моделі та формують вихідну матрицю результатів моделювання;

– виконують ідентифікацію параметрів математичної моделі та складають діагностичні карти Шухарта [10]. Визначають верхню (U_{CL}) і нижню допустимі межі (L_{CL}) та середні значення кожного параметра.

Висновки

1. У статті наведені математичні моделі ЕГП і СЦ агрегату AP20H, і його імітаційна модель у середовищі Matlab/Simulink.

2. Виконана ідентифікація параметрів математичної моделі ЕГП і СЦ за МНК з використанням різних кроків квантування часу і визначено допустимий крок квантування часу чисельного інтегрування диференціальних рівнянь математичних моделей.

3. Як видно з рис. 5, 6 і 7 математична модель ЕГП і СЦ з оцінками параметрів, отриманими МНК з кроком квантування часу $\Delta t = 0,01$ (с), описують переміщення РЗ (ЕГП) і ВЛ (СЦ) з похибками $1,914 \cdot 10^{-6}$ мм і $2,157 \cdot 10^{-5}$ мм.

4. На рис. 10–12 показані зміни оцінок параметрів вектора \mathbf{a} математичної моделі ЕГП залежно від зміни кожного коефіцієнта впливаючих факторів,

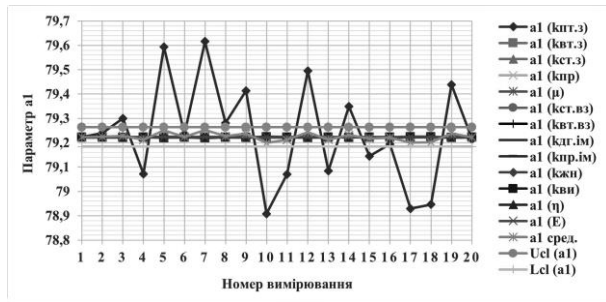
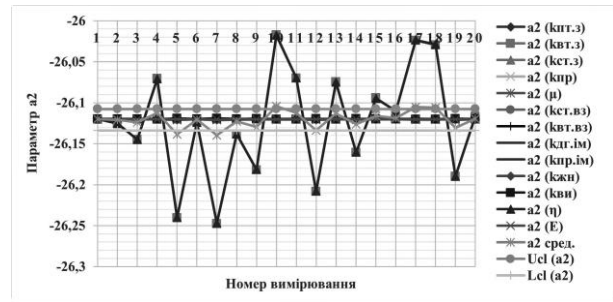
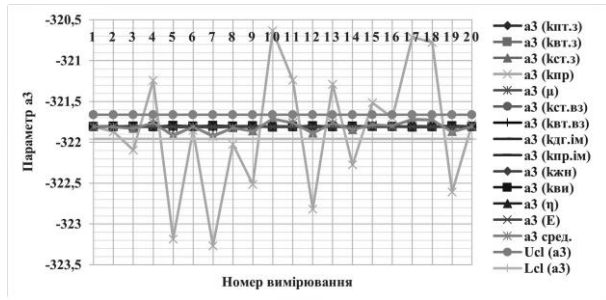
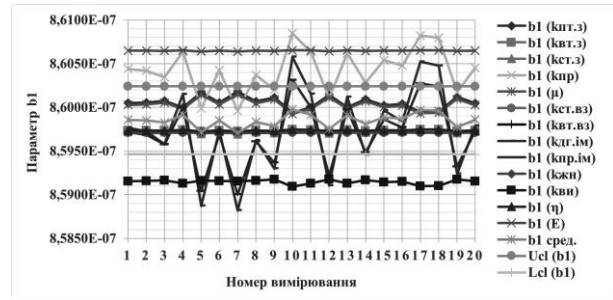
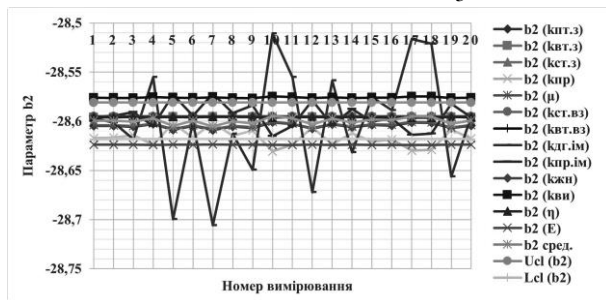
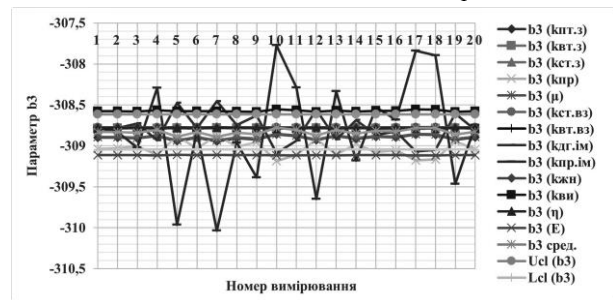
верхні та нижні допустимі межі параметрів, а також зміну середніх значень цих параметрів.

Результати на рис. 10 показують, що на зміну параметра a_1 найбільш ймовірно впливає зміна коефіцієнта $k_{пт.з}$. Цей фактор є діагностичною ознакою, що вказує на наявність проблеми з електромагнітним перетворювачем ЕГП, який змінює швидкість переміщення якоря, що призводить до зміни тиску рідини у порожнинах РЗ і швидкості переміщення РЗ (наприклад, через наявність повітря або води у гідравлічній рідині).

З рис. 11 випливає, що на зміну параметра a_2 найбільш ймовірно впливає зміна коефіцієнта $k_{вт.з}$ і динамічної в'язкості η . Ці фактори є діагностичними ознаками, що вказують на наявність залипання або перекоосу РЗ (відбувається різке, але короткочасне зростання коефіцієнта), а також утворення задирів, налипання металевої крихти на крайки золотникових пар або наявність домішок у гідравлічній рідині.

З рис. 12 видно, що на зміну параметра a_3 найбільш ймовірно впливає зміна коефіцієнта $k_{пр}$. Цей фактор є діагностичною ознакою і вказує на несправність плоскої механічної пружини зворотного зв'язку (наприклад, витік у РЗ через механічне зношення ущільнень або золотниковою парою, або відхилення золотника від нейтрального положення, або зміна пружності пружини).

5. З рис. 13–15, показані зміни оцінок параметрів вектора \mathbf{b} математичної моделі СЦ залежно від зміни кожного коефіцієнта впливаючих факторів, верхні та нижні допустимі межі параметрів, а також середні значення цих параметрів.

Рис. 10. Зміна параметра a_1 Рис. 11. Зміна параметра a_2 Рис. 12. Зміна параметра a_3 Рис. 13. Зміна параметра b_1 Рис. 14. Зміна параметра b_2 Рис. 15. Зміна параметра b_3

З рис. 13 видно, що на зміну параметра b_1 найбільш ймовірно впливають зміни коефіцієнтів $k_{пр}$, $k_{дг.ім}$, $k_{пр.ім}$, $k_{ви}$ і об'ємного модуля пружності робочої рідини E . Ці фактори є діагностичними ознаками, що вказують на наявність внутрішнього витіку рідини в СЦ, або на зміну тиску рідини через витік в ЕПП, або на зміну об'ємного модуля пружності рідини (наприклад, через зміну температури), або на зміну зовнішньої сили.

З рис. 14 випливає, що на зміну параметра b_2 найбільш ймовірно впливає зміна коефіцієнта $k_{дг.ім}$. Цей фактор є діагностичною ознакою і вказує на наявність зміни зовнішньої сили, що діє від гідроциліндра.

Рисунок 15 показує, що на зміну параметра b_3 найбільш ймовірно впливає зміна коефіцієнта $k_{пр.ім}$. Цей фактор є діагностичною ознакою і вка-

зує на наявність зміни зовнішньої сили, що діє від імітатора пропорційного навантаження (торсіон)

6. Таким чином, у статті розроблена методика ідентифікації параметрів математичної моделі та визначення факторів (діагностичних ознак), що вказують на появу найбільш ймовірних несправностей.

Література

1. Сырицын, Т. А. Эксплуатация и надёжность гидро- и пневмоприводов [Текст] / Т. А. Сырицын. – М. : Машиностроение, 1990. – 248 с.
2. Iserman, R. Fault-diagnosis applications. Model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors and fault-tolerant systems [Text] / R. Iserman. – New York : Springer, 2011. – 354 p.
3. Chinniah, Y. A. Fault detection in the electrohydraulic actuator using extended Kalman filter: thesis for

the degree of Doctor of Philosophy [Text] / Y. A. Chinniah. – Saskatoon, 2004. – 251 p.

4. Shiqiang, L. *Fault Diagnosis for Electrohydraulic Servo Valve Based on Support Vector Machine // Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling, October 2012. – Paris, 2012. – 5 p.*

5. Коновалов, В. И. *Идентификация и диагностика систем [Текст] / В. И. Коновалов. – Томск : Томский политехнический университет, 2010. – 163 с.*

6. Сейдж, Э. П. *Теория оценивания и ее применение в связи и управлении [Текст] / Э. П. Сейдж, Д. Л. Мелса. – М. : Связь, 1976. – 496 с.*

7. Попов, Д. Н. *Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем [Текст]: учеб. для вузов / Д. Н. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1987. – 464 с.*

8. Vyas, J. J. *Electro-hydraulic actuation systems: Design, testing, identification and validation [Text] / J. J. Vyas, B. Gopalsamy, H. Joshi. – Singapore : Springer, 2018. – 70 p.*

9. *Инженерные исследования гидроприводов летательных аппаратов [Текст] / Д. Н. Попов, С. А. Ермаков, И. Н. Лобода [и др.] ; под ред. Д. Н. Попова. – М. : Машиностроение, 1978. – 142 с.*

10. Химмельблау, Д. *Анализ процессов статистическими методами [Текст] / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1973. – 958 с.*

2. Iserman, R. *Fault–diagnosis applications. Model–based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors and fault–tolerant systems.* New York, Springer Publ., 2011. 354 p.

3. Chinniah, Y. A. *Fault detection in the electrohydraulic actuator using extended Kalman filter : Thesis for the degree of Doctor of Philosophy.* Saskatoon, 2004. 251 p.

4. Shiqiang, L. *Fault Diagnosis for Electrohydraulic Servo Valve Based on Support Vector Machine. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling, October 2012, Paris, 2012. 5 p.*

5. Konovalov, V. I. *Identifikatsiya i diagnostika sistem [Identification and diagnostics of systems].* Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2010. 163 p.

6. Seidzh, E. P. & Melsa, D. L. *Teoriya otsenivaniya i ee prime-nenie v svyazi i upravlenii [The theory of evaluation and its application in communication and management].* Moscow, Communication Publ., 1976. 496 p.

7. Popov, D. N. *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem [Dynamics and regulation of hydraulic and pneumatic systems].* Moscow, Mechanical engineering Publ., 1987. 464 p.

8. Vyas, J. J., Gopalsamy, B. & Joshi, H. *Electrohydraulic actuation systems: Design, testing, identification and validation.* Singapore, Springer Publ., 2018. 70 p.

9. Popov, D. N., Ermakov, S. A., Loboda, I. N. et al. *Inzhenernye issledovaniya gidroprivodov letatel'nykh apparatov [Engineering research of aircraft hydraulic drives].* Moscow, Mechanical engineering Publ., 1978. 142 p.

10. Khimmel'blau, D. *Analiz protsessov statisticheskimi metodami [Analysis of processes by statistical methods].* Moscow, World Publ., 1973. 958 p.

References

1. Syritsyn, T. A. *Ekspluatatsiya i nadezhnost' gidro– i pnevmoprivodov [Operation and reliability of hydraulic and pneumatic drives].* Moscow, Mechanical engineering Publ., 1981. 248 p.

Надійшла до редакції 03.06.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF MATHEMATICAL MODELS AND DETERMINATION OF DIAGNOSTIC FEATURES

Tran Manh Hung

In this article, the object of research is two main units of the AR20N aggregate – electrohydraulic amplifier (EHA) and power cylinder (PC). Detection of the occurrence and development of faults in them will be considered on the basis of the identification of parameters of the developed mathematical models. The main objectives of the research were to identify the parameters of mathematical models of EHA and PC using different steps of time quantization, determination of the optimal step of time quantization for numerical integration of differential equations; determination of diagnostic features that have the most probable influence on the operation of aggregate units at the occurrence of various faults. For achievement of the set objectives the following tasks were solved: mathematical models of EHA, PC, and simulation model of the aggregate research on the test bench were developed; identifica-

tion of parameters of mathematical models of EHA and PC by the method of least squares (MLS) was carried out; the permissible step of time quantization was determined; upper and lower permissible limits of the identifiable parameters for a serviceable aggregate were determined; a methodology for determining the diagnostic features that are most probable to determine the emerging faults of the aggregate has been developed. Methods are used for this purpose: analytical, numerical, statistical, hydraulic systems theory, and system identification theory. The following results were obtained: differential equations describing the displacements of the distributive spool (DS) of the EHA and the output link (OL) of the PC; algorithms for identifying the parameters of mathematical models by MLS; the permissible step of time quantization was determined; and a technique for determining the diagnostic features using the Shewhart diagnostic chart for the parameters of mathematical models was developed. The scientific and practical novelty of the obtained results consists of the following: mathematical models of EHA and PC of the aggregate have been developed; simulation model of the aggregate on the test bench has been developed; simulation of various faults of the aggregate units has been carried out and identification of parameters of mathematical models of these units has been carried out; changes of estimations of parameters of mathematical models of EHA and PC depending on changes of each influencing factor have been obtained; upper and lower permissible limits of parameters and average values of these parameters have been determined; diagnostic features that are most probable to influence aggregate performance have been determined. It is shown that time quantization step $\Delta t = 0.01$ (с) provides the determination of DS and OL displacements with errors of $1.914 \cdot 10^{-6}$ mm and $2.157 \cdot 10^{-5}$ mm.

Keywords: aggregate; electrohydraulic amplifier; power cylinder; identification of parameters; mathematical model; diagnostic feature; simulation model.

Чан Мань Хунг – асп. каф. конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Tran Manh Hung – PhD Student, Department of Aircraft Engine Design, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: tranmanhhung1202@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9854-780X.