

Рис.2. Поверхня коефіцієнтів передачі оптимального регулятора

дисперсія помилки стабілізації  $\sigma_{\epsilon}^2 = 4 \cdot 10^{-4}$  град.<sup>2</sup>. Для тих же експлуатаційних умов польоту дисперсія помилки стабілізації з існуючим неоптимальним регулятором  $\sigma_{\epsilon}^2|_{\text{н.опт}} = 2 \cdot 10^{-2}$  град.<sup>2</sup>[3].

Таким чином, точність стабілізації підвищується на порядок. Крім того, як показали дослідження, при роботі з неоптимальним регулятором дисперсія сигналу керування прагне до нескінченності. Важливим результатом динамічного конструювання також є отримана інформація (рис. 2) про зміну оптимальних параметрів системи залежно від експлуатаційної ситуації здійснюваного польоту. Це дозволяє створювати оптимальні адаптивні системи стабілізації.

### Список літератури

1. Блохин Л.Н. Оптимальные системы стабилизации. – К.: Техніка, 1982 – 144 с.
2. Туник А.А., Блохин Л.Н., Кривоносенко А.П. Алгоритмы и программы решения на ЭВМ задач автоматического управления полетом. – К.: КИИГА, 1988. – 87 с.
3. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1973 – 503 с.

Стаття надійшла до редакції 04.10.01.

УДК 629.736.072.8;681.3

В.В. Кабанячий, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМІЧНИХ СТЕНДІВ АВІАЦІЙНИХ ТРЕНАЖЕРІВ

*Наведено методику визначення динамічних характеристик, які дозволяють оцінити придатність динамічних стендів до імітації акселераційних діянь на авіаційних тренажерах.*

Для отримання високої якості імітації акселераційних діянь на авіаційних тренажерах динамічний стенд (ДС) повинен досить точно відтворювати рухи, що задаються законом керування. Функціонування ДС можна розглядати як реакцію на вхідні керуючі діяння і початкові умови. Характер реакції ДС визначається кінцевою швидкістю протікання процесів, тобто динамічними властивостями. Оскільки ДС призначений для точного відтворення закону керування, то динамічні властивості відіграють негативну роль. Реакція реального ДС складається з корисних сигналів – сигналів, перетворення яких є його призначенням, – і за-

вад – сигналів, які заважають ДС виконувати свої функції і є відхиленням вихідного сигналу реального ДС від вихідного сигналу ідеального ДС. Під ідеальним розуміється такий ДС, який абсолютно точно здійснює потрібне перетворення корисного керуючого діяння. Визначення завад дозволяє оцінити якість ДС.

Як показали проведені дослідження, поняття якості ДС є багатогранним і містить сукупність показників якості, що визначають здатність ДС імітувати акселераційні діяння (це можливо лише у випадку, якщо характеристики ДС відомі із заданою точністю і відповідають нормам) і характеризують узагальнений стан ДС, а характерною особливістю оцінки якості ДС є необхідність урахування різних характеристик ДС, що визначають успішність його функціонування за певних умов. Так, пілот дуже чутливий до порушень безперервності або поштовхів. Тому одним з головних недоліків і однією з найгостріших проблем, з якою зустрічаються в ДС авіаційних тренажерів, є недостатня плавність його переміщення, зумовлена такими чинниками, як люфти, тертя в підшипниках та ущільненнях гідроприводів, пороги чутливості у золотниках, момент інерції, ступінь демпфірування коливань, жорсткість та резонансні частоти коливань, властиві конкретному гідроприводу та конструкції ДС, запирання гідроциліндра у випадку, якщо керуючий сигнал дорівнює нулю (стисливість властива гідравлічній рідині, запертії у циліндрі, діє аналогічно пружині з незатухаючими коливаннями) тощо. Оскільки ДС діє як нелінійний фільтр, іншими важливими характеристиками є ослаблення амплітуди і фазовий зсув.

Оцінка сукупності показників якості характеризує технічний стан ДС тільки на вибраному фіксованому режимі контролю, що відображає певний діапазон умов його роботи. Проблема вибору режиму контролю є однією з найважливіших. Стосовно ДС очевидно, що найбільші переваги має вибір найвірогіднішого режиму роботи. Передусім це стосується ширини смуги частот – діапазону частотних характеристик, на які реагує ДС. Людина, як і ДС, має обмежену ширину смуги частот. Як показали дослідження Knotts і Vaily [1], при виконанні завдань ручного керування ширина смуги частот пілота становить 2 Гц. Вважається, що реакція ДС буде відповідати вимогам отримання високої якості відповідності акселераційних діянь на літальному апараті і авіаційному тренажері, якщо вона перевищуватиме це значення. Ранні шестистепеневі ДС опорного типу були якраз приблизно такими і результати були незадовільними, особливо при використанні у складі авіаційних тренажерів літаків-винищувачів. Якщо ширина смуги частот ДС нижча від 2 Гц, то акселераційні діяння імітуються із запізненням та ще й спотворюються. Для уникнення цього ширина смуги частот ДС повинна бути достатньо широкою для пропускання всіх низькочастотних сигналів до 2 Гц без зміни відносних амплітуд і фазових співвідношень. Задоволення цих вимог вимагає, щоб динаміка ДС мала стійкий приріст і затримка сигналів на всіх частотах була однаковою (до 2 Гц). Для цього ширина смуги частот ДС повинна бути настільки широкою, наскільки це можливо. Сучасні ДС розробляються із шириною смуги частот 10 Гц. З цієї шириною смуги частот ДС частоти до 2 Гц проходять без викривлень із часовою затримкою, меншою ніж 20 мс.

Дуже важливим чинником у розробці ДС є власна частота стенда з встановленою на платформі кабіною. Динамічний стенд буде резонувати близько власної частоти, що визначається його жорсткістю. Для зменшення викривлень і забезпечення потрібної реакції з мінімальним фазовим зсувом або часовим запізненням власна частота ДС повинна бути вищою від ширини смуги частот. Для цього власна або резонансна частота ДС повинна бути настільки високою, наскільки це можливо. При збільшенні довжини циліндрів (для збільшення тривалості імітації акселераційних діянь) власна частота ДС буде зменшуватися. Для компенсації цього жорсткість циліндрів повинна збільшуватися. Цього можна досягти збільшеннями механічної жорсткості циліндра, діаметра циліндра (збільшенням стовпа масла), гідравлічного тиску, об'ємного модуля пружності рідини.

Для визначення динамічних характеристик ДС формується синусоїдальний керуючий сигнал заданої амплітуди і частоти:

$$u_{ji} = \begin{cases} 0 & \left| \begin{array}{l} 0 \leq t_i \leq t_0; \\ t_i > t_0 + 4T_u; \end{array} \right. \\ A_u \sin(2\pi \times f_u \times t_i) & \left| \begin{array}{l} t_0 \leq t_i \leq t_0 + 4T_u; \\ j = \overline{1,6}; i = \overline{1,m_i} \end{array} \right. \end{cases}$$

де  $u_{ji}$  – керуючий сигнал за  $j$ -м ступенем вільності у  $i$ -й момент часу;  $j$  – індекс ступеня вільності:  $j = 1$  – поздовжній,  $j = 2$  – вертикальний,  $j = 3$  – поперечний ступені вільності,  $j = 4$  – крен,  $j = 5$  – ристання,  $j = 6$  – тангаж;  $i$  – індекс кроку керування;  $A_u$ ,  $f_u$ ,  $T_u$  – відповідно амплітуда, частота і період керуючого сигналу ( $T_u = 1/f_u$ );  $t_i = h_i(i-1)$ ,  $i = \overline{1,m_i}$  – поточний час;  $h_i$  – крок обчислень;  $m_i$  – кількість кроків керування;  $t_0$  – інтервал часу, в межах якого керуючий сигнал дорівнює нулю.

Нормованими є характеристики ДС при керуючих сигналах, які відповідають керуючим сигналам, що використовуються для імітації акселераційних діянь, обумовлених маневровим рухом літального апарата – частота керуючого сигналу 0,2 Гц та амплітуда переміщення ДС за лінійними ступенями вільності 0,4 м і за кутовими – 4 град. Динамічний стенд установлюється у вихідне положення, на вхід агрегатів керування подається керуючий сигнал, реєструються сигнали датчиків лінійних прискорень  $\{s_{\Delta ji}, j = \overline{1,3}, i = \overline{1,m_i}\}$  та кутових швидкостей  $\{s_{\Delta ji}, j = \overline{4,6}, i = \overline{1,m_i}\}$  третього періоду руху платформи динамічного стенду (ПДС) (для уникнення впливу на характеристики перехідних режимів). Розраховуються лінійні прискорення і кутові швидкості:

$$\ddot{s}_{ji} = \frac{\ddot{s}_{\Delta ji} - \ddot{s}_{\Delta 0j}}{k_{aj}}, j = \overline{1,3}; \quad \dot{s}_{ji} = \frac{\dot{s}_{\Delta ji} - \dot{s}_{\Delta 0j}}{k_{aj}}, j = \overline{4,6}; \quad i = \overline{1,m_i},$$

де  $s_{ji}, s_{ji}, s_{\Delta ji}, s_{\Delta ji}$  – відповідно лінійне прискорення і кутова швидкість ПДС, сигнали датчиків лінійного прискорення і кутової швидкості ПДС за  $j$ -м ступенем вільності в  $i$ -й момент часу;  $s_{\Delta 0j}, s_{\Delta 0j}, k_{aj}$  – відповідно середні значення сигналів датчиків лінійного прискорення і кутової швидкості ПДС при нульовому керуючому сигналі та коефіцієнт градування датчика за  $j$ -м ступенем вільності;  $m_i = T_u / h_i$  – кількість кроків керування одного періоду.

Параметри руху ПДС за вертикальним ступенем вільності й тангажем показані на рис. 1.

При керуванні ДС гармонічним керуючим сигналом параметри руху описуються полігармонічним процесом, тобто такою функцією часу, яка точно повторює свої значення через однакові інтервали. Тому параметри руху за керуванням ступенем вільності можуть бути представлені рядом Фур'є

$$\ddot{s}_{ji} = a_{0j} + \sum_{q=1}^{m_u/2} a_{qi} \cos \frac{2\pi \times q \times i}{m_u} + \sum_{q=1}^{m_u/2} b_{qi} \sin \frac{2\pi \times q \times i}{m_u}; j = \overline{1,3}; i = \overline{1,m_i};$$

$$\dot{s}_{ji} = a_{0j} + \sum_{q=1}^{m_u/2} a_{qi} \cos \frac{2\pi \times q \times i}{m_u} + \sum_{q=1}^{m_u/2} b_{qi} \sin \frac{2\pi \times q \times i}{m_u}; j = \overline{4,6}; i = \overline{1,m_i},$$

де  $q$  – номер гармоніки;  $a_{0j}, a_{qj}, b_{qj}$  – коефіцієнти Фур'є:

$$a_{0j} = \frac{1}{m_u} \sum_{i=1}^{m_u} s_{\Delta ji}, j = \overline{1,3}; \quad a_{0j} = \frac{1}{m_u} \sum_{i=1}^{m_u} s_{\Delta ji}, j = \overline{4,6};$$

$$a_{qj} = \frac{2}{m_u} \sum_{i=1}^{m_u} s_{\Delta ji} \cos \frac{2\pi \times q \times i}{m_u}; \quad q = \overline{1, m_u/2 - 1}, j = \overline{1,3};$$

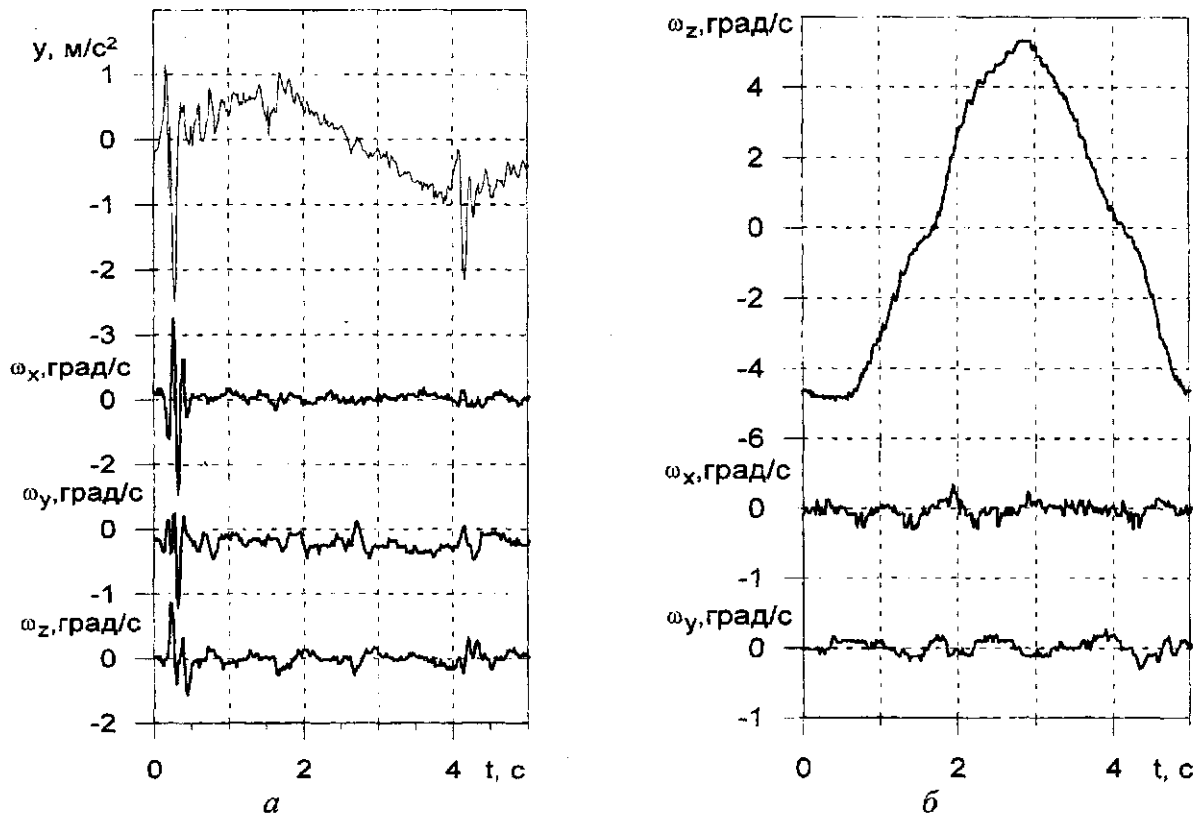


Рис.1. Параметри ПДС при русі за вертикальним ступенем вільності (а), за тангажем (б)

$$a_{qj} = \frac{2}{m_u} \sum_{i=1}^{m_u} s_{\pi,j,i} \cos \frac{2\pi \times q \times i}{m_u}, q = \overline{1, m_u/2 - 1}, j = \overline{4, 6};$$

$$b_{qj} = \frac{2}{m_u} \sum_{i=1}^{m_u} s_{\pi,j,i} \sin \frac{2\pi \times q \times i}{m_u}, q = \overline{1, m_u/2 - 1}, j = \overline{1, 3};$$

$$b_{qj} = \frac{2}{m_u} \sum_{i=1}^{m_u} s_{\pi,j,i} \sin \frac{2\pi \times q \times i}{m_u}, q = \overline{1, m_u/2 - 1}, j = \overline{4, 6}.$$

Амплітуда  $q$ -ї гармоніки ряду визначається за формулою:

$$A_{qj} = \sqrt{a_{qj}^2 + b_{qj}^2},$$

де  $A_{qj}$  – амплітуда  $q$ -ї гармоніки за  $j$ -м ступенем вільності.

Фазовий зсув

$$\varphi_{зсj} = \operatorname{arctg} \frac{a_{1j}}{b_{1j}} \times 57,3, j = \overline{1, 3}; \quad \varphi_{зсj} = \operatorname{arctg} \frac{-b_{1j}}{a_{1j}} \times 57,3, j = \overline{4, 6},$$

коефіцієнт послаблення амплітуди

$$k_{посj} = \frac{A_{1j}}{A_u (2\pi \times f_u)^2}, j = \overline{1, 3}; \quad k_{посj} = \frac{A_{1j}}{A_u \times 2\pi \times f_u}, j = \overline{4, 6},$$

де  $\varphi_{зсj}$ ,  $k_{посj}$  – відповідно фазовий зсув і коефіцієнт послаблення амплітуди лінійного прискорення (кутової швидкості) за  $j$ -м ступенем вільності.

Амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики будуть дійсними, якщо функція періодична [2; 3]. Інтервал аналізу містить цілу кількість періодів, функція має обмежений спектр з верхньою граничною частотою  $f_c$ , а частота дискретизації задовольняє теорему Котельнікова  $f_c \leq 0,5 / h_t$ .

Амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики динамічного стенда ДС6-1,5 наведені у табл. 1. Для забезпечення високої якості імітації акселераційних діянь коефіцієнт послаблення амплітуди прискорення (швидкості) повинен бути не меншим ніж 0,85, а модуль фазового зсуву – не перевищувати 45 градус.

Таблиця 1

Амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики ДС6-1,5

Степінь вільності	Характеристика	Частота				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Поздовжня	Коефіцієнт послаблення амплітуди прискорення	0,87	0,92	---	---	---
	Фазовий зсув, град	-2,7	-15,7	---	---	---
Вертикальна	Коефіцієнт послаблення амплітуди прискорення	1,02	1,04	---	---	---
	Фазовий зсув, град	-7,6	-21,7	---	---	---
Поперечна	Коефіцієнт послаблення амплітуди прискорення	0,97	0,98	---	---	---
	Фазовий зсув, град	-17,3	-21,9	---	---	---
Крен	Коефіцієнт послаблення амплітуди швидкості	1,01	0,99	0,96	0,92	0,88
	Фазовий зсув, град	-15,0	-23,4	-32,3	-40,2	-45,5
Рискання	Коефіцієнт послаблення амплітуди швидкості	0,99	0,97	0,94	0,89	0,84
	Фазовий зсув, град	-16,6	-25,3	-34,3	-41,9	-47,3
Тангаж	Коефіцієнт послаблення амплітуди швидкості	1,00	0,98	0,94	0,90	0,86
	Фазовий зсув, град	-15,7	-24,4	-33,5	-41,1	-46,4

Якість руху ДС оцінюється значенням середньоквадратичного відхилення лінійного прискорення і кутової швидкості ПДС від корисного значення за керованим ступенем вільності

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m_u} \sum_{i=1}^{m_u} [\ddot{s}_{ji} - \ddot{s}_{1j}]^2}, j = \overline{1,3}; \quad \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m_u} \sum_{i=1}^{m_u} [\dot{s}_{ji} - \dot{s}_{1j}]^2}, j = \overline{4,6},$$

де  $\sigma_j$  – середньоквадратичне відхилення лінійного прискорення і кутової швидкості ПДС від корисного значення за керованим  $j$ -м ступенем вільності;  $\ddot{s}_{1j}$ ,  $\dot{s}_{1j}$  – відповідно корисні складові лінійного прискорення і кутової швидкості ПДС за  $j$ -м ступенем вільності, описано першою гармонікою ряду Фур'є, а також середньоквадратичними відхиленнями кутових швидкостей ПДС за некерованими ступенями вільності

$$\sigma_{js} = \sqrt{\frac{1}{m_u} \sum_{i=1}^{m_u} [\dot{s}_{ji}]^2}, j = \overline{1,6}, s = \overline{4,6},$$

де  $\sigma_{js}$  – середньоквадратичне відхилення кутової швидкості ПДС за  $s$ -м ступенем вільності при переміщенні за  $j$ -м ступенем вільності;  $s$  – індекс некерованого кутового ступеня вільності.

За значеннями середньоквадратичних відхилень  $\sigma_j$  і  $\sigma_{js}$  можна оцінити придатність ДС до імітації маневрового руху літального апарата: чим нижче значення середньоквадратичних відхилень, тим вища якість руху ДС. Як показали дослідження, середньоквадратичні відхилення лінійного прискорення та кутової швидкості від основної гармоніки повинні бути не більшими від  $0,25 \text{ м/с}^2$  і  $0,25 \text{ град/с}$  відповідно. Лінійні прискорення і кутові

швидкості ПДС без основної гармоніки показані на рис. 2 і 3. Середньоквадратичні відхилення при вертикальному русі й русі тангажу ПДС наведені в табл. 2 і 3.

Для аналізу паразитних прискорень (швидкостей) ПДС за керованим ступенем вільності розраховується спектральний склад прискорень (швидкостей) ПДС (рис. 4). Амплітуда першої гармоніки показує амплітуду корисного прискорення (швидкості), а амплітуда інших гармонік, кратних частоті керуючого сигналу, показують паразитні прискорення (швидкості). Паразитні прискорення (швидкості) не повинні перевищувати ті, що визначаються порогами сприйняття людини. У діапазоні частот від 0,2 до 10 Гц при рухах ДС за лінійними степенями вільності амплітуди паразитних прискорень не повинні перевищувати  $0,1 \text{ м/с}^2$ , а при рухах ДС за кутовими степенями вільності амплітуди кутових швидкостей –  $1 \text{ град/с}$ .

Значення визначених характеристик дозволяють (на підґрунті порівняння значень характеристик з допусками на них) прийняти рішення про придатність або непридатність конкретного ДС до імітації акселераційних діянь на авіаційних тренажерах. У випадку прийняття рішення про непридатність ДС виникає задача діагностики несправностей – визначення місця і чинників несправностей. Результати діагностики є підґрунтям прийняття рішення про необхідність регулювання або ремонту ДС.

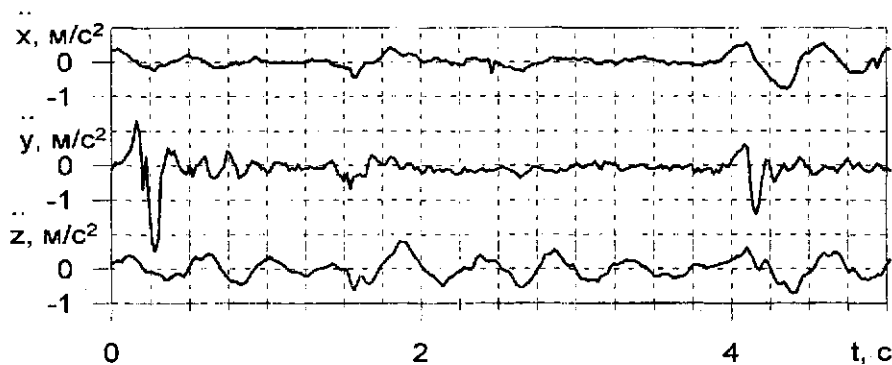


Рис.2. Лінійні прискорення ПДС без основної гармоніки

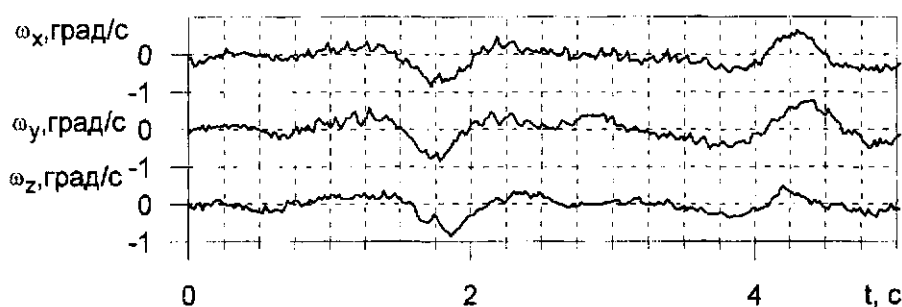


Рис.3. Кутові швидкості ПДС без основної гармоніки

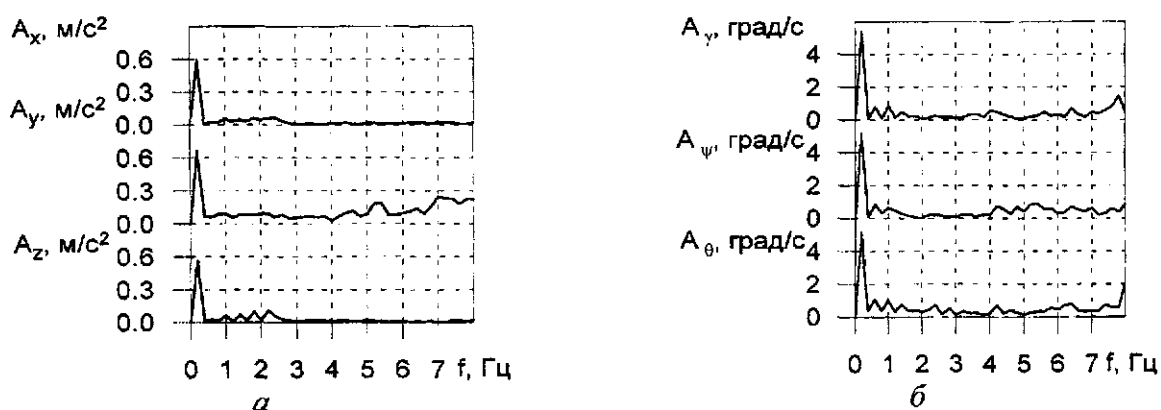


Рис. 4. Спектральний склад лінійних (а) і кутових (б) прискорень ПДС

Таблиця 2

## Середньоквадратичні відхилення при русі ПДС за вертикальним ступенем вільності

Частота, Гц	Характеристики паразитного руху			
	за вертикальним ступенем вільності, м/с <sup>2</sup>	за креном, град/с	за рисканням, град/с	за тангажем, град/с
0,1	0,0945	0,1355	0,5503	0,1490
0,2	0,3639	0,3797	0,2611	0,2781

Таблиця 3

## Середньоквадратичні відхилення при русі ПДС за тангажем

Частота, Гц	Характеристики паразитного руху, град/с		
	за тангажем	за креном	за рисканням
0,1	0,1396	0,0770	0,0956
0,2	0,3088	0,1052	0,1036
0,3	0,4395	0,1261	0,1129
0,4	0,5935	0,1648	0,1439
0,5	0,6652	0,2313	0,1487

Аналіз наведених характеристик ДС показує задовільні амплітудно-частотні й фазочастотні характеристики. З іншого боку, середньоквадратичні відхилення і амплітуди паразитних прискорень при русі ПДС за вертикальним ступенем вільності й тангажем перевищують допуск. Це саме підтверджують часові залежності параметрів руху ПДС за вертикальним ступенем вільності – вертикального прискорення (інтервали часу 0,1 – 0,4 с і 4 – 4,25 с), швидкостей крену, рискання і тангажу (інтервали часу 0,1 – 0,4 с) – та за тангажем – швидкість крену (інтервали часу 1,5 – 2,5 с і 4 – 4,5 с). Динамічний стенд з такими характеристиками не придатний до імітації маневрового руху літаків: пілот сприймає високочастотні трясіння, нехарактерні для руху реального літака. Для визначення місця і чинників несправностей ДС та прийняття необхідних рішень потрібно проаналізувати й інші характеристики (динамічні й статичні характеристики, характеристики якості регулювання гідроприводів).

## Список літератури

1. *Knotts Louis H. and Baily Randall E.* Ground Simulator Requirements Based On In-Flight Simulation Calspan Advanced Technology Center–Buffalo NY. – 1988.
2. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
3. *Введение в цифровую фильтрацию* /Под. ред. Р.Богнера, А. Констандинидиса. – М.: Мир, 1976. – 216 с.

Стаття надійшла до редакції 08.10.01.