

УДК 629.736.072.8:681.3

0509-48

В.В. Кабанячий, канд. техн. наук

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ ГІДРОЦИЛІНДРІВ ШЕСТИСТЕПЕНЕВИХ ДИНАМІЧНИХ СТЕНДІВ ОПОРНОГО ТИПУ

Національний авіаційний університет, aerodyn@nau.edu.ua

Розглянуто актуальність, постановку та точне розв'язання задачі визначення переміщень гідроциліндрів шестистепеневих динамічних стендів залежно від параметрів конструкції й потрібних переміщень за степенями вільності.

Постановка проблеми

Неодмінною складовою всіх комплексних тренажерів літаків і вертольотів є динамічний стенд (ДС). Із сучасних авіаційних тренажерів розповсюдження отримали чотири конструктивні схеми ДС [1; 2]: ліфтового типу, в якій кабіну тренажера переміщують за напрямними; консольного типу, в якій кабіну тренажера закріплюють на балці; каскадного типу, в якій одну ступінь вільності розміщують над іншою; опорного типу, в якій використовують кінематичний механізм, а кабіну тренажера встановлюють на силових приводах, одночасне керування якими дозволяє здійснювати переміщення платформи динамічного стенда (ПДС) за потрібною кількістю степенів вільності. У разі необхідності забезпечення переміщень ПДС за шістьма степенями вільності в діапазоні не менше ніж ± 1 м за лінійними степенями вільності і $\pm 30^\circ$ за кутовими степенями вільності ДС опорного типу мають найменші величини тертя та маси рухомих частин у порівнянні з іншими. Завдяки цьому вони забезпечують кращі динамічні характеристики. Крім цього, конструкція ДС опорного типу простіша за інші і не обмежує огляд через ліхтар кабіни. Тому в практиці світового тренажеробудування найбільше розповсюдження отримали шестистепеневі ДС опорного типу.

Через високу вартість сучасних ДС і необхідність створення комплексних тренажерів літаків Ан-70, Ан-140, Ан-124, Ан-148 тощо актуальною є проблема підвищення ефективності використання наявних і розробка нових високоефективних ДС. Важливою складовою цієї проблеми є визначення з достатньою точністю переміщень гідроциліндрів ДС залежно від параметрів конструкції й бажаних переміщень за степенями вільності та вибір оптимальних конструктивних параметрів на основі компромісу між кінематично неможливим переведенням ПДС у небезпечне положення, яке досягається достатністю наявних максимальних зусиль гідроциліндрів для подо-

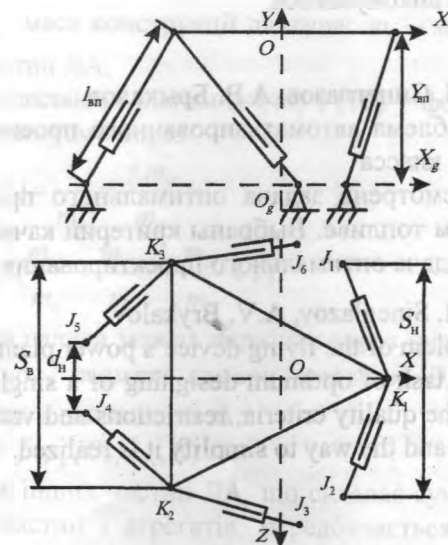
лання моментів від масових сил рухомої частини ДС для будь-яких еволюцій платформи, необхідними робочими діапазонами переміщень за степенями вільності та вартістю розробки, виготовлення й експлуатації ДС.

Аналіз останніх досліджень

Наближені методи розв'язання цієї задачі, включаючи нівелювання й експериментальні дослідження, не задовольняють сучасних вимог до якості керування ДС авіаційних тренажерів, а конструктивні параметри ДС, розроблені Пензенським конструкторським бюро машинобудування, не є оптимальними. Динамічний стенд із довжиною гідроциліндрів 1,5 м має завищений ресурс, що повністю практично не використовується тренажерами транспортних літаків. Динамічний стенд із довжиною гідроциліндрів 1 м має недостатній ресурс, що змушує обмежити сукупність імітованих акселераційних діянь. Особливо невдалою є конструкція гідроциліндрів ТС-1000, що суттєво обмежує ресурси ДС.

Формулювання цілі

Шестистепеневий ДС опорного типу, кінематичну схему якого наведена на рисунку, включає



Кінематична схема ДС опорного типу

трикутну платформу та шість однакових опорних гідроприводів. З платформою ДС гідроприводи з'єднані трьома триступневими шарнірами, розміщеними у вершинах рівнобічного трикутника $K_1K_2K_3$. З нерухомою основою гідроприводи з'єднані двоступневими шарнірами, розміщеними на одному колі. Кожний триступневий шарнір з'єднує ПДС із парою гідроприводів. За рахунок змін довжин гідроприводів (висування і прибирання штоків гідроциліндрів) така конструкція ДС забезпечує переміщення платформи за шістьма степенями вільності.

Для шестиступеневого ДС опорного типу характерна участь усіх шести гідроприводів при русі за будь-яким зі степенів вільності, за винятком руху крену, в якому задіяні чотири гідроприводи. Це призводить до сильної взаємозалежності руху ПДС за різними степенями вільності. Необхідність забезпечення руху ПДС за декількома степенями вільності одночасно вимагає точного розв'язання задачі визначення переміщень гідроциліндрів залежно від потрібних переміщень ПДС за степенями вільності:

$$l_k = W_u(s), k = \overline{1,6};$$

$$s \in S,$$

де l_k – переміщення k -го гідроциліндра; W_u – оператор перетворення переміщень ПДС за окремими степенями вільності в переміщення гідроциліндрів; s – вектор потрібних переміщень ПДС за окремими степенями вільності: $s = |x, y, z, \gamma, \psi, \vartheta|^T$, $x, y, z, \gamma, \psi, \vartheta$ – відповідно переміщення ПДС за поздовжнім, вертикальним, поперечним степенями вільності, креном, рисканням та тангажем; k – номер гідроциліндра; S – область допустимих переміщень ПДС, що являє собою замкнену обмежену множину та залежить від способу керування ДС і довжини гідроциліндрів.

Виклад основного матеріалу

Для формування оператора W_u введемо (див. рисунок) зв'язану з ПДС праву систему координат $OXYZ$, початок якої (точка O) знаходиться у площині верхніх шарнірів $K_1K_2K_3$, а осі OX , OY і OZ паралельні відповідним осям літального апарату, та нормальну нерухомию земну систему координат $O_gX_gY_gZ_g$, початок якої (точка O_g) збігається з проекцією точки O на площину нижніх шарнірів ДС $J_1J_2J_3J_4J_5J_6$ за умови рівності переміщень гідроциліндрів

$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5 = l_6$, а осі якої O_gX_g , O_gY_g і O_gZ_g паралельні відповідним осям OX , OY і OZ . Кутова орієнтація зв'язаної системи координат $OXYZ$ відносно земної системи координат $O_gX_gY_gZ_g$ визначається кутами крену γ , рискання ψ й тангажа ϑ .

Координати центрів обертання верхніх шарнірів гідроприводів у зв'язаній системі координат $OXYZ$ описують виразом:

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + A_{33} \begin{pmatrix} x_{B0} \\ y_{B0} \\ z_{B0} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де x_B , y_B , z_B – вектори координат центрів обертання верхніх шарнірів гідроприводів у земній системі координат відповідно:

$$x_B = \{x_{Bk}\}, y_B = \{y_{Bk}\}, z_B = \{z_{Bk}\}, k = \overline{1,6};$$

x_{Bk} , y_{Bk} , z_{Bk} – координати центрів обертання k -х верхніх шарнірів гідроприводів у земній системі координат $O_gX_gY_gZ_g$; x_{B0} , y_{B0} , z_{B0} – вектори обертання верхніх шарнірів гідроприводів у зв'язаній системі координат $OXYZ$ за осями OX , OY і OZ відповідно: $x_{B0} = \{x_{B0k}\}$,

$y_{B0} = \{y_{B0k}\}$, $z_{B0} = \{z_{B0k}\}$, $k = \overline{1,6}$; x_{B0k} , y_{B0k} , z_{B0k} – координати центрів обертання k -х верхніх шарнірів гідроприводів у зв'язаній системі координат $OXYZ$; A_{33} – матриця перетворення від зв'язаної системи координат $OXYZ$ до земної системи координат $O_gX_gY_gZ_g$ [3]:

$$A_{33} = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\vartheta & \sin\vartheta & -\cos\vartheta\sin\psi \\ -\sin\vartheta\cos\psi & \cos\vartheta\cos\psi & \cos\psi\sin\vartheta + \sin\vartheta\sin\psi \\ \sin\psi\sin\vartheta & \sin\psi\cos\vartheta & \sin\psi\cos\vartheta \\ \sin\vartheta\cos\psi & \cos\vartheta\cos\psi & \cos\psi\cos\vartheta - \sin\vartheta\sin\psi \\ \sin\vartheta\sin\psi & -\cos\vartheta\sin\psi & -\sin\vartheta\cos\psi \\ \sin\psi\cos\vartheta & \sin\psi\sin\vartheta & \sin\psi\sin\vartheta \end{pmatrix}.$$

Формулу (1) у скалярному вигляді описують системою рівнянь:

$$\begin{aligned} x_{Bk} &= x + x_{B0k}\cos\psi\cos\vartheta + z_{B0k}(\sin\vartheta\cos\psi\sin\vartheta + \sin\psi\cos\vartheta); \\ y_{Bk} &= y + x_{B0k}\sin\vartheta - z_{B0k}\cos\vartheta\sin\vartheta + Y_{Bk}; \\ z_{Bk} &= z - x_{B0k}\cos\vartheta\sin\psi + z_{B0k}(\cos\psi\cos\vartheta - \sin\vartheta\sin\psi\sin\vartheta), k = \overline{1,6}, \end{aligned} \quad (2)$$

де Y_{Bk} – координата верхніх шарнірів гідроприводів у вихідному положенні ПДС:

$$Y_{\text{вп}} = \sqrt{l_{\text{вп}}^2 + (x_{\text{вк}} - x_{\text{нк}})^2 + (z_{\text{вк}} - z_{\text{нк}})^2},$$

$x_{\text{нк}}, z_{\text{нк}}$ – координати центрів обертання k -х нижніх шарнірів у земній системі координат $O_g X_g Y_g Z_g$; $l_{\text{вп}}$ – довжина гідроциліндра, яка відповідає вихідному положенню ПДС і дорівнює половині робочого ходу $l_{\text{вп}} = (l_{\text{макс}} - l_{\text{мін}})/2$; $l_{\text{макс}}, l_{\text{мін}}$ – довжини гранично висунутого і гранично прибраного гідроциліндрів, які визначають як відстань між верхніми та нижніми шарнірами гідроприводів у напрямку повністю висунутого та повністю прибраного гідроциліндра відповідно.

Координати центрів обертання нижніх шарнірів гідроприводів у земній системі координат $O_g X_g Y_g Z_g$ та центрів обертання верхніх шарнірів гідроприводів у зв'язаній системі координат $OXYZ$ визначають трьома величинами: сторонами трикутників між нижніми й верхніми шарнірами та відстанню між опорами нижніх шарнірів (див. рисунок):

$$z_{\text{во}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,5S_{\text{н}} \\ 0,5S_{\text{в}} \\ -0,5S_{\text{в}} \\ -0,5S_{\text{н}} \end{pmatrix}; \quad x_{\text{н}} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}(S_{\text{н}} + 4d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(S_{\text{н}} + 4d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(S_{\text{н}} + 2d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(S_{\text{н}} + 2d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(5S_{\text{н}} + 2d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(5S_{\text{н}} + 2d_{\text{н}})/12 \end{pmatrix};$$

$$x_{\text{во}} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}S_{\text{в}}/4 \\ \sqrt{3}S_{\text{в}}/4 \\ -\sqrt{3}S_{\text{в}}/4 \\ -\sqrt{3}S_{\text{в}}/4 \\ -\sqrt{3}S_{\text{в}}/4 \\ -\sqrt{3}S_{\text{в}}/4 \end{pmatrix}; \quad z_{\text{н}} = \begin{pmatrix} -0,5S_{\text{н}} \\ 0,5S_{\text{н}} \\ 0,5(S_{\text{н}} + d_{\text{н}}) \\ 0,5d_{\text{н}} \\ -0,5d_{\text{н}} \\ -0,5(S_{\text{н}} + d_{\text{н}}) \end{pmatrix},$$

де $S_{\text{н}}, S_{\text{в}}$ – відповідно сторони трикутників між нижніми й верхніми шарнірами; $d_{\text{н}}$ – відстань між опорами нижніх шарнірів.

Числові та натурні дослідження, проведені в Пензенському конструкторському бюро моделювання, виявили [4], що для забезпечення стійкості та безпечної експлуатації ДС відстань між нижніми опорами повинна дорівнювати відстані між верхніми опорами: $S_{\text{н}} = S_{\text{в}}$. Виходячи з останнього співвідношення, для визначення координат центрів обертання нижніх шарнірів гідроприводів у земній системі координат $O_g X_g Y_g Z_g$ та центрів обертання верхніх шарнірів гідроприводів у зв'язаній системі координат

$OXYZ$ достатньо задати три величини: сторони трикутників між нижніми й верхніми шарнірами та відстань між опорами нижніх шарнірів (див. рисунок):

$$z_{\text{во}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,5S_{\text{н}} \\ 0,5S_{\text{н}} \\ -0,5S_{\text{н}} \\ -0,5S_{\text{н}} \end{pmatrix}; \quad x_{\text{н}} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}(S_{\text{н}} + 4d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(S_{\text{н}} + 4d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(S_{\text{н}} + 2d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(S_{\text{н}} + 2d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(5S_{\text{н}} + 2d_{\text{н}})/12 \\ \sqrt{3}(5S_{\text{н}} + 2d_{\text{н}})/12 \end{pmatrix};$$

$$x_{\text{во}} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}S_{\text{н}}/4 \\ \sqrt{3}S_{\text{н}}/4 \\ -\sqrt{3}S_{\text{н}}/4 \\ -\sqrt{3}S_{\text{н}}/4 \\ -\sqrt{3}S_{\text{н}}/4 \\ -\sqrt{3}S_{\text{н}}/4 \end{pmatrix}; \quad z_{\text{н}} = \begin{pmatrix} -0,5S_{\text{н}} \\ 0,5S_{\text{н}} \\ 0,5(S_{\text{н}} + d_{\text{н}}) \\ 0,5d_{\text{н}} \\ -0,5d_{\text{н}} \\ -0,5(S_{\text{н}} + d_{\text{н}}) \end{pmatrix}.$$

Розраховані за цими формулам точні координати центрів обертання нижніх та верхніх шарнірів гідроприводів ДС6-1 та ДС6-1,5 наведено у табл. 1, 2, 3.

Таблиця 1

Координати центрів обертання шарнірів гідроприводів ДС6-1, м

Номер гідропривода	$Z_{\text{во}}$	$X_{\text{во}}$	$Z_{\text{н}}$	$X_{\text{н}}$
1	0	1,16913	-1,35	0,678387
2	0	1,16913	1,35	0,678387
3	1,35	-1,16913	1,6	0,245374
4	1,35	-1,16913	0,25	-2,092895
5	-1,35	-1,16913	-0,25	-2,092895
6	-1,35	-1,16913	-1,6	0,245374

Таблиця 2

Координати центрів обертання шарнірів гідроприводів ДС6-1,5, м

Номер гідропривода	$Z_{\text{во}}$	$X_{\text{во}}$	$Z_{\text{н}}$	$X_{\text{н}}$
1	0	1,78574	-2,06	1,036344
2	0	1,78574	2,06	1,036344
3	2,06	-1,78574	2,44	0,3747
4	2,06	-1,78574	0,38	-3,196789
5	-2,06	-1,78574	-0,38	-3,196789
6	-2,06	-1,78574	-2,44	0,3747

Таблиця 3

Координата центрів обертання верхніх шарнірів і довжина гідроциліндра, яка відповідає вихідному положенню ПДС

ДС	$Y_{вп}$	$l_{вп}$
ДС6-1	1,834548	2,33
ДС6-1 (з ТС-1000)	2,092394	2,538
ДС6-1,5	2,790888	3,55

Переміщення гідроциліндрів розраховують за формулою:

$$l_k = \sqrt{(x_{вк} - x_{нк})^2 + y_{вк}^2 + (z_{вк} - z_{нк})^2} - l_{вп}, \quad (3)$$

$$k = 1,6.$$

Отже, для однозначного визначення оператора перетворення W_u потрібно задати довжини гранично висунутого та гранично прибраного гідроциліндрів l_{max} і l_{min} , сторону трикутника між нижніми шарнірами S_n і відстань між опорами нижніх шарнірів d_n .

Висновки

Формули (2) та (3) являють собою систему нелінійних рівнянь, яка повністю визначає залежність переміщень гідроциліндрів від переміщень ПДС за окремими степенями вільності. Отже, ці рівняння, які описують керування приводом шестистепеневого ДС опорного типу, є шуканим оператором перетворення W_u . Через те, що при виведенні рівнянь (2) та (3) ніякі обмеження на конфігурацію не накладалися, то вони правдиві для будь-якого шестистепеневого ДС опорного типу.

Використання наведеного оператора перетворень в імітаторах акселераційних діянь комплексних тренажерів літаків Ту-204, Іл-96-300 [5] та Ан-74ТК-200 [6] показало його високу ефективність. Крім того, його застосування дозволяє:

– досліджувати усі конструктивні схеми шестистепеневих ДС опорного типу (Стеварта, мо-

дифікована Стеварта, з перехресними приводами, з фіксованими приводами тощо);

– визначити допустимі переміщення, оптимальні робочі діапазони переміщень ПДС за степенями вільності й оптимальні залежності координат осей тангажа, крену й ризику;

– розробляти високоєфективні способи керування ДС для підвищення якості імітації акселераційних діянь на авіаційних тренажерах;

– визначити залежності між довжиною гідроциліндрів й робочими діапазонами переміщень ПДС за лінійними степенями вільності, тангажем та оптимальні довжини гідроциліндрів ДС.

Список літератури

1. Бюшгес Г.С., Студнев Р.В. Аэродинамика самолета: Динамика продольного и бокового движения. – М.: Машиностроение. – 1979. – 352 с.
2. Determination of Force Cueing Requirements for Tactical Combat Flight Training Devices: Report // SIMTEC, Inc. 10364 Battlevue Parkway Manassas, VA 20109-2338 ASC-TR-97-5001. – 1996. – 137 p.
3. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1969. – 499 с.
4. Имитатор перегрузок КТС Ил-62МЗ. Эскизно-технический проект / ППО "Эра". – Шифр 415.40.577. – Пенза, 1983. – 206 с.
5. Сотников Д.А., Кабанячий В.В. Программная реализация в цифровом варианте циклического закона управления (ЦЗУ-6) шестистепенным динамическим стендом в составе авиационных тренажеров неманевренных самолетов Ту-204, Ил-96-300. – М.: МГА, – 1989. – 163 с.
6. Исследования ДС6-1,5 и реализация ЦЗУ в составе имитатора акселерационных воздействий ИПС-74ТК-200; Отчет о НИР/ Киев. междунар. ун-т гражданской авиации (КМУГА); Руководитель Д.А. Сотников. – № ГР 0195U025224. – К., 1998. – 130 с.

Стаття надійшла до редакції 09.04.03.

В.В. Кабанячий

Определение перемещений гидроцилиндров шестистепенных динамических стендов опорного типа

Рассмотрена актуальность, постановка и точное решение задачи определения перемещений гидроцилиндров шестистепенных динамических стендов в зависимости от параметров конструкции и требуемых перемещений по степеням свободы.

V.V. Kabanyachy

Displacement determinations of synergistic motion platform jacks

Urgency, statement and precise solution of displacement determinations problem of synergistic motion platform jacks depending on construction parameters and desired displacements along degrees of freedom are represented.