УДК 629.736.072.8; 681.3

ОПТИМАЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ РЕСУРСІВ ДИНАМІЧНИХ СТЕНДІВ ПРИ ІМІТАЦІЇ АКСЕЛЕРАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ ЗА КУТОВИМИ СТЕПЕНЯМИ ВІЛЬНОСТІ

В. В. Кабанячий, канд. техн. наук, доц.

Національний авіаційний університет

VKabanyachyi@ukr.net

Наведено постановку та розв'язання задачі оптимального використання конструктивних ресурсів динамічних стендів при імітації акселераційних впливів за кутовими степенями вільності, що дало змогу значно підвищити якість фізичного моделювання на пілотажних стендах.

Ключові слова: динамічний стенд, імітація акселераційних впливів, пілотажний стенд.

Formulation and solution of the problem of optimal use of design resources of motion system while force cueing along the angular degrees of freedom which significantly improve the quality of physical modeling on flight simulators is presented.

Keywords: motion system, force cueing, flight simulator.

Постановка проблеми

Важливою складовою фізичного моделювання динамічних властивостей цивільних повітряних суден (ПС) на пілотажних стендах є імітація акселераційних впливів (АВ) за кутовими степенями вільності. Особливо велике значення вона має для моделювання критичних режимів польоту (таких як режим звалювання й рухи у штопорі). Актуальність імітації критичних режимів польоту підтверджується катастрофами ПС, що сталися останніми роками і були зумовлені неспроможністю екіпажу вивести ПС зі «штопора» через відсутність необхідних навичок пілотування. Одним із чинників недостатньо адекватного моделювання критичних режимів польоту є відсутність якісної імітації АВ за кутовими степенями вільності.

Аналіз досліджень і публікацій

Запатентований спосіб формування кутових переміщень платформи динамічного стенда (ПДС) за кутовими степенями вільності [1] і сформульована задача імітації АВ на пілотажних стендах [2] суттєво збільшили робочі діапазони переміщень ПДС за кутовими степенями вільності. Однак лишився невикористаний конструктивний ресурс.

Цілі. Для вирішення проблеми оптимального використання конструктивних ресурсів динамічних стендів введемо (рис. 1) 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* й *OZ* паралельні відповідним осям літального апарата, і нормальну нерухому земну систему координат $O_gX_gY_gZ_g$, початок якої точка O_g збігається з проекцією точки *O* на площину нижніх шарнірів динамічного стенда $J_1J_2J_3J_4J_5J_6$ за умови рівності довжин гідроприводів $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5 = l_6$, де l_k — довжина *k*-го гідроциліндра, а осі якої O_gX_g, O_gY_g й O_gZ_g паралельні відповідним осям *OX*, *OY* й *OZ*. Кутова орієнтація зв'язаної системи координат $O_gX_gY_gZ_g$ визначається кутами крену γ, рискання ψ й тангажа ϑ.

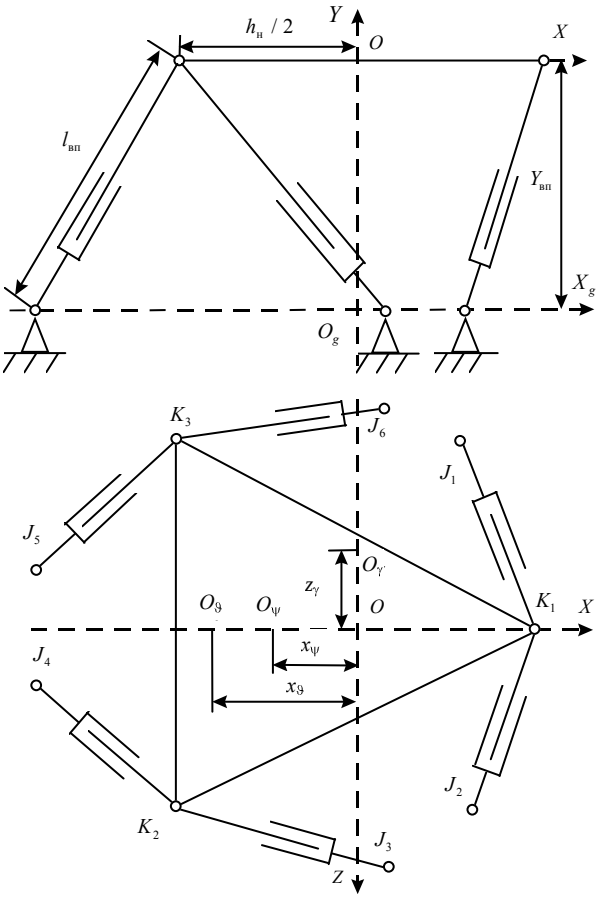

Рис. 1. Кінематична схема шестистепеневого динамічного стенда

© В. В. Кабанячий, 2012

Координати центрів обертання верхніх шарнірів гідроприводів у зв'язаній системі координат *OXYZ* описуються системою рівнянь:

$$x_{\text{в}k} = x + x_{\text{в}0k} - 0{,}5\Big[\ x_{\text{в}0k} - x_{\psi}\ \ \psi^2 +$$

$$+\ x_{\text{в}0k} - x_{\vartheta}\ \ \vartheta^2\Big] +\ z_{\text{в}0k} - z_{\gamma}\ \ \vartheta\,\gamma + z_{\text{в}0k}\ \psi;$$

$$y_{\text{в}k} = y +\ x_{\text{в}0k} - x_{\vartheta}\ \ \vartheta -\ z_{\text{в}0k} - z_{\gamma}\ \ \gamma + Y_{\text{вп}}\ ;$$

$$z_{\text{в}k} = z -\ x_{\text{в}0k} - x_{\psi}\ \ \psi + z_{\text{в}0k} - 0{,}5\Big[\ z_{\text{в}0k} - z_{\gamma}\ \times$$

$$\times\,\gamma^2 + z_{\text{в}0k}\ \psi^2\Big],\ k = \overline{1,6},$$

де $x_{\text{в}k}$, $y_{\text{в}k}$, $z_{\text{в}k}$ — відповідно координати центрів обертання *k*-х верхніх шарнірів гідроприводів у земній системі координат $O_gX_gY_gZ_g$ уздовж поздовжньої осі O_gX_g, вертикальної осі O_gY_g і поперечної осі O_gZ_g; $x_{\text{в}0k}$, $z_{\text{в}0k}$ — відповідно координати центрів обертання *k*-х верхніх шарнірів гідроприводів у зв'язаній системі координат *OXYZ* уздовж поздовжньої осі *OX* і поперечної осі *OZ*; $Y_{\text{вп}}$ — координата верхніх шарнірів гідроприводів уздовж вертикальної осі *OY* у вихідному положенні ПДС

$$Y_{\text{вп}} = \sqrt{l_{\text{вп}}^2 + (x_{\text{в}k} - x_{\text{н}k})^2 + (z_{\text{в}k} - z_{\text{н}k})^2}\ ,$$

де $l_{\text{вп}}$ — довжина гідроциліндру, що відповідає вихідному положенню ПДС і дорівнює половині робочого ходу гідроциліндрів $l_{\text{вп}} = (l_{\max} - l_{\min})/2$, де $l_{\max}$, $l_{\min}$ — відповідно довжини гідроциліндрів при гранично висунутому і гранично прибраному штокові; $x_{\text{н}k}$, $z_{\text{н}k}$ — відповідно координати центрів обертання *k*-х нижніх шарнірів у земній системі координат $O_gX_gY_gZ_g$ уздовж поздовжньої осі O_gX_g і поперечної осі O_gZ_g.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Традиційно переміщення ПДС за креном здійснюється (рис. 1) переміщенням попарно третього і четвертого й п'ятого і шостого (у протилежному напрямку) гідроциліндрів при нерухомих першому і другому гідроциліндрах. При цьому вісь крену O_γ нерухома і збігається з точкою *O* початку зв'язаної системи координат *OXYZ*, а максимальний кут крену ПДС залежить від досягнення будь-яким гідроциліндром обмеження за переміщенням (максимально висунутого або максимально прибраного положень). Наближаючи вісь крену до гідроциліндра, який може першим стати критичним, є можливість збіль-шити робочі діапазони переміщень ПДС за кутовими степенями вільності. Крім цього, існує можливість залежно від конкретних потреб імітації АВ збільшити тією чи іншою мірою робочий діапазон переміщень ПДС за бажаним кутовим степенем вільності.

Так, однією з найважливіших задач є розширення робочих діапазонів переміщень ПДС за креном й тангажем для імітації швидко змінюваних АВ за креном, імітації тангажа ПС, повільно змінюваних АВ відповідно за поперечним і поздовжнім степенями вільності та забезпечення мінімально потрібного діапазону переміщення ПДС за рисканням для імітації швидко змінюваних АВ за цим степенем вільності.

Для досягнення цієї мети координати осей тангажа і рискання вздовж поздовжньої осі задаються у вигляді кусково-лінійних залежностей від кута тангажа, а координата осі крену вздовж поперечної осі задається у вигляді кусково-лінійної залежності від кута крену

$$x_{\vartheta} = \begin{cases} \overline{x}_{\vartheta} & \Big|\vartheta \le -\vartheta^*; \\ \overline{x}_{\vartheta} + \dfrac{x_{\vartheta}^{+} - \overline{x}_{\vartheta}}{2\vartheta^*}\ \vartheta + \vartheta^* & \Big|-\vartheta^* < \vartheta < \vartheta^*; \\ \overline{x}_{\vartheta} & \Big|\vartheta \ge -\vartheta^*; \end{cases}$$

$$x_{\psi} = \begin{cases} \overline{x}_{\psi} & \Big|\vartheta \le -\vartheta^*; \\ \overline{x}_{\psi} + \dfrac{x_{\psi}^{+} - \overline{x}_{\psi}}{2\vartheta^*}\ \vartheta + \vartheta^* & \Big|-\vartheta^* < \vartheta < \vartheta^*; \\ \overline{x}_{\psi} & \Big|\vartheta \ge -\vartheta^*; \end{cases}$$

$$z_{\gamma} = \operatorname{sign}(\gamma\,\vartheta)\times$$

$$\times\begin{cases} z_{\gamma}^{-} & \Big|\gamma \le \gamma_{\gamma 1} = -\gamma^*; \\ z_{\gamma i} + \dfrac{z_{\gamma(i+1)} - z_{\gamma i}}{\gamma_{\gamma(i+1)} - \gamma_{\gamma i}}\ \gamma - \gamma_{\gamma i} & \Big|\begin{matrix}\gamma_{\gamma i} < \gamma \le \gamma_{\gamma(i+1)}, \\ i = \overline{1, n_{\gamma} - 1};\end{matrix} \\ z_{\gamma}^{+} & \Big|\gamma > \gamma_{\gamma n\gamma} = \gamma^*, \end{cases}$$

де x_{ϑ}, x_{ψ} — відповідно координати осей тангажа й рискання вздовж поздовжньої осі OX; ϑ^*, γ^* — відповідно робочі діапазони тангажа і крену ПДС; x_{ϑ}^{-}, x_{ϑ}^{+}, x_{ψ}^{-}, x_{ψ}^{+} — відповідно координати осей тангажа й рискання, які відповідають від'ємному $-\vartheta^*$ й додатному ϑ^* значенням робочого діапазону тангажа ПДС; z_{γ} — координата осі крену вздовж поперечної осі OZ; z_{γ}^{-}, z_{γ}^{+} — відповідно координати осі крену ПДС, що відповідають від'ємному $-\gamma^*$ і додатному γ^* значенням робочого діапазону крену ПДС; $z_{\gamma i}$ — координата осі крену вздовж поперечної осі OZ в *i*-й точці розбиття робочого діапазону крену ПДС

$[-\gamma^*;\gamma^*]$ на підінтервали $[\gamma_{\gamma i};\ \gamma_{\gamma(i+1)}]$, $i=\overline{1,n_\gamma-1}$; i — індекс точки розбиття робочого діапазону крену ПДС $[-\gamma^*;\gamma^*]$ на підінтервали $[\gamma_{\gamma i};\ \gamma_{\gamma(i+1)}]$, $i=\overline{1,n_\gamma-1}$; n_γ — кількість точок розбиття робочого діапазону крену ПДС $[-\gamma^*;\gamma^*]$ на підінтервали $[\gamma_{\gamma i};\ \gamma_{\gamma(i+1)}]$, $i=\overline{1,n_\gamma-1}$; $\gamma_{\gamma i}$ — i-а точка розбиття робочого діапазону крену ПДС $[-\gamma^*;\gamma^*]$ на підінтервали $[\gamma_{\gamma i};\ \gamma_{\gamma(i+1)}]$, $i=\overline{1,n_\gamma-1}$.

Геометричний сенс задачі визначення оптимальних робочих діапазонів переміщень ПДС за кутовими степенями вільності зводиться до вписування в область можливих положень ПДС $\tilde{U}$ паралелепіпеда $\tilde{P}_{\gamma\psi\vartheta}$, довжина одного ребра якого дорівнює мінімально потрібному діапазону переміщення ПДС за рисканням, а довжини двох інших ребер не менші мінімально потрібних діапазонів переміщень ПДС за креном й тангажем

$$\tilde{P}_{\gamma\psi\vartheta}=\left\{\gamma,\psi,\vartheta\ \middle|\ \begin{array}{l}\gamma^*\ge\gamma_{\min},\\ -\psi_{\min}\le\psi\le\psi_{\min},\\ \vartheta^*\ge\vartheta_{\min}\end{array}\right\},$$

де $\tilde{P}_{\gamma\psi\vartheta}$ — паралелепіпед; $\gamma_{\min}$, $\psi_{\min}$, $\vartheta_{\min}$ — відповідно мінімально потрібні діапазони переміщень ПДС за креном, рисканням і тангажем.

Осі тангажа й рискання ПС знаходяться в центрі мас, розташованому на значній відстані від кабіни екіпажу.

Традиційно осі тангажа й рискання знаходяться у 1/2 або 1/3 висоти трикутника ПДС. Тому при зміщенні осей тангажа та рискання у напрямку центра мас ПС

$$x_\vartheta\to x_{\text{ö.ì}}\ ;\ x_\psi\to x_{\text{ö.ì}}\ ,$$

де $x_{\text{ö.ì}}$ — координата центра мас ПС, за рахунок виникаючого кутового руху ПДС з'являється додаткове лінійне прискорення і АВ на пілотажному стенді наближаються до АВ, що виникають у реальному польоті.

Пошуковими є кусково-лінійні залежності координат осей тангажа й рискання вздовж поздовжньої осі OX від кута тангажа, кусково-лінійна залежність координати осі крену вздовж поперечної осі OZ від кута крену, робочі діапазони переміщень ПДС за креном й тангажем.

Сума оптимальних робочих діапазонів переміщень ПДС за цими степенями вільності повинна бути максимальною

$$\gamma^*+\vartheta^*\to\max;$$

$$\tilde{P}_{\gamma\psi\vartheta}\subset\tilde{U};\quad x_\vartheta\to x_{\text{ö.ì}}\ ;\ x_\psi\to x_{\text{ö.ì}}\ ,$$

де $\tilde{U}$ — область можливих положень ПДС.

Розв'язання задачі здійснювалося модифікованим методом деформівного багатогранника. Знайдені залежності координат осі крену від кута крену та осей рискання і тангажа від кута тангажа показано на рис. 2.

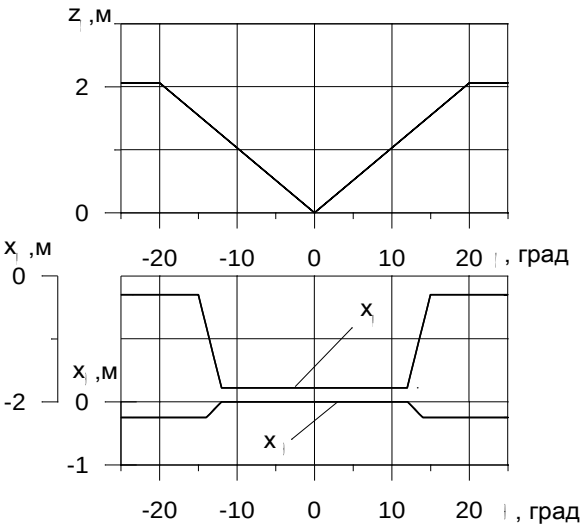

Рис. 2. Залежності координат кутових осей при оптимальному підході

Основою оцінки використання наявних ресурсів ПДС за кутовими степенями вільності може слугувати залежність допустимих переміщень ПДС за креном від кута тангажа

$$\bar{\gamma}(\vartheta)\to\max;\left(\begin{array}{l}L_{\text{ù}}\in\Omega_l;-\psi^*\le\psi\le\psi^*;\\ -\vartheta^*\le\vartheta\le\vartheta^*\end{array}\right)$$

$$L_{\text{ù}},\psi,\vartheta,$$

де $\bar{\gamma}(\vartheta)$ — допустиме переміщення ПДС за креном; ψ^* — робочий діапазони рискання ПДС; Ω_l — область визначення довжин гідроциліндрів; $L_{\text{ù}}$ — вектор довжин гідроциліндрів $L_{\text{ù}}=l_k, k=\overline{1,6}$.

На рис. 3 показано залежності допустимих переміщень ПДС за креном від кута тангажа при традиційному (крива *2*) та оптимальному підході (крива *1*).

Проведені розрахунки показують суттєві переваги оптимального підходу для забезпечення максимальних робочих діапазонів переміщень ПДС за кутовими степенями вільності. Так, традиційний підхід забезпечує робочі діапазони переміщень ПДС за рисканням ψ^* = 4 град, за тангажем ϑ^* = 12 град. і за креном γ^* = 10,4 град, а

оптимальний — за рисканням $\psi^* = 4$ град, за тангажем $\vartheta^* = 12$ град і за креном $\gamma^* = 19{,}2$ град.

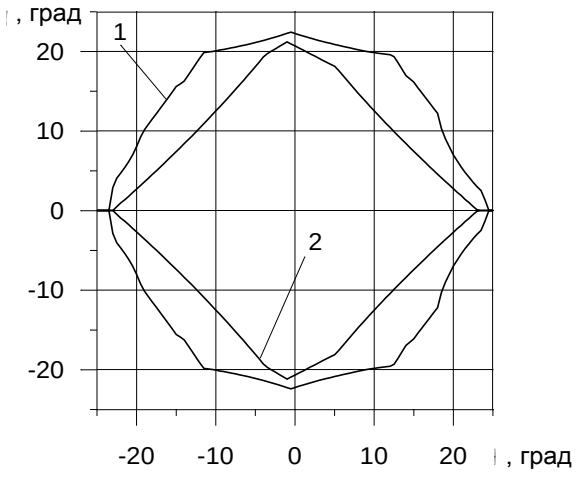

Рис. 3. Допустимі переміщення ПДС

Тобто робочий діапазон переміщення ПДС за креном збільшився майже у два рази.

Висновки

Сформульована постановка задачі оптимального використання конструктивних ресурсів динамічних стендів при імітації АВ за кутовими степенями вільності й запропоноване її розв'язання значно розширює робочі діапазони переміщень ПДС за кутовими степенями вільності та завдяки цьому суттєво підвищує якість фізичного моделювання на пілотажних стендах.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Пат. 23144А* Україна / Спосіб управління приводними ланками шестиступеневого динамічного стенда опорного типу при формуванні кутових переміщень платформи / Д. О. Сотников, В. В. Кабанячий (Україна). — № 97031459; Заявл. 28.03.97; Опубл. 30.06.98. Бюл. № 3.

2. *Кабанячий В. В.* Імітація акселераційних діянь на авіаційних тренажерах // Вісник НАУ / В. В. Кабанячий. — К. : НАУ. — 2001. — № 2. — С. 96–102.

Стаття надійшла до редакції 18.12.2012.