

УДК 629.736.072.8; 681.3

В.В. Кабанячий

Національний авіаційний університет, Київ

## ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПІЛОТАЖНИМИ СТЕНДАМИ ЗА ОСЯМИ ТАНГАЖУ І РИСКАННЯ З УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТИВНОГО РЕСУРСУ

Наведено постановку задачі й методику визначення оптимальних залежностей координат осей тангажу і рискання платформи шестиступеневого динамічного стенду у складі пілотажних стендів. Завдяки використанню схеми пріоритетів імітації акселераційних впливів за степенями вільності розраховані оптимальні залежності координат осей тангажу і рискання дозволяють ефективніше використовувати конструктивний ресурс шестиступневих динамічних стендів для фізичного моделювання динамічних властивостей повітряних суден на пілотажних стендах і наблизити імітовані акселераційні впливи до реальних.

**Ключові слова:** шестиступневий динамічний стенд, пілотажний стенд, фізичне моделювання динамічних властивостей повітряних суден.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При русі шестиступневих динамічних стендів опорного типу (ДС6) (рис. 1), на яких встановлюються кабіни пілотажних стендів, за будь-яким зі степенів вільності задіяні усі шість гідроциліндрів (за винятком руху креном, в якому задіяні чотири гідроциліндри).

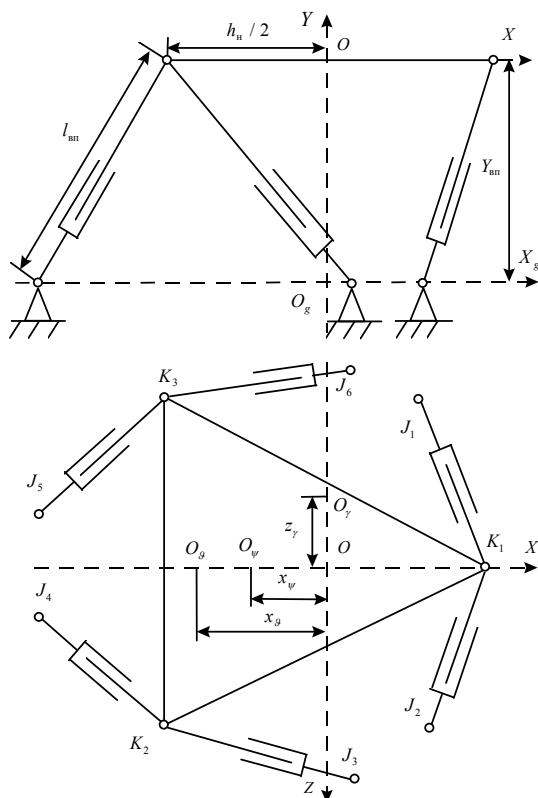


Рис. 1. Кінематична схема ДС6

Це призводить до сильної взаємозалежності руху платформи динамічного стенду (ПДС) за різними степенями вільності: рух за будь-яким зі степенів вільності призводить до зменшення допустимих пе-

реміщень за іншими степенями вільності. Через значні технічні проблеми сучасні ДС6 використовують гідроциліндри довжиною до 2 м, що накладає обмеження на допустимі робочі переміщення ПДС. Тому актуальною є задача оптимального використання наявних конструктивних ресурсів ДС6.

**Аналіз останніх досліджень.** Одна з найважливіших складових фізичного моделювання динамічних властивостей повітряних суден (ПС) на пілотажних стендах – імітація акселераційних впливів (АВ). Для її здійснення (рис. 2) кінематичні параметри руху ПС, розраховані у блоці динаміки польоту пілотажного стенду, перетворюються у закон керування у кінематичні параметри руху ДС6. Відповідно розрахованого просторового положення ДС6 розраховуються необхідні переміщення гідроциліндрів і їхні керуючі сигнали, які після відповідного масштабування подаються у систему керування ДС6. Переміщення ДС6 забезпечує імітацію АВ.

Відомі чотири публікації [1 – 4], в яких започатковано розв'язання проблеми ефективного використання конструктивних ресурсів ДС6.

На підґрунті квадратичного наближення, що полягав у заміні тригонометричних функцій кутів

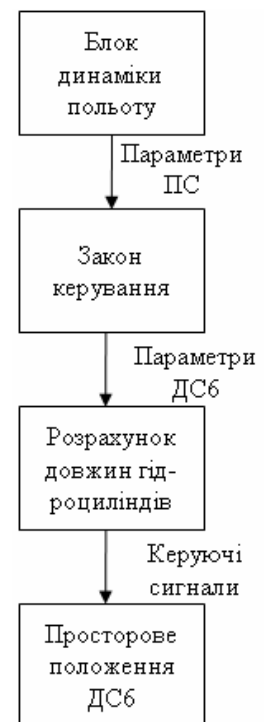


Рис. 2. Схема імітації АВ на пілотажних стендах

самими кутами і збереженні в рівняннях величин лише першого та другого порядку малості, вважаючи кути малими величинами і враховуючи невеликий діапазон їхніх змін у межах максимальних переміщень ПДС, координати центрів обертання верхніх шарнірів гідроприводів ДС6 у земній системі координат  $O_g X_g Y_g Z_g$  були описані рівняннями [1]:

$$\begin{aligned} x_{bk} &= x + x_{bk} \left[ 1 - 0,5(\psi^2 + \theta^2) \right] + z_{bk} (\theta \gamma + \psi); \\ y_{bk} &= y + x_{bk} \theta - z_{bk} \gamma + Y_{вп}; \\ z_{bk} &= z - x_{bok} \psi + z_{bok} \left[ 1 - 0,5(\psi^2 + \gamma^2) \right], \quad k = \overline{1,6}, \end{aligned}$$

де  $x_{bk}$ ,  $y_{bk}$ ,  $z_{bk}$  – координати центрів обертання  $k$ -х верхніх шарнірів гідроприводів у земній системі координат  $O_g X_g Y_g Z_g$  відповідно за осями  $O_g X_g$ ,  $O_g Y_g$  й  $O_g Z_g$ ;  $x_{bok}$ ,  $y_{bok}$ ,  $z_{bok}$  – відповідно координати центрів обертання  $k$ -х верхніх шарнірів гідроприводів у зв'язаній системі координат  $OXYZ$  за осями  $OX$ ,  $OY$  й  $OZ$ ;  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\gamma$ ,  $\psi$ ,  $\theta$  – відповідно переміщення ПДС за поздовжнім, вертикальним, поперечним степенями вільності, креном, рисканням і тангажем;  $Y_{вп}$  – координата верхніх шарнірів гідроприводів за вертикальною віссю  $OY$  у початковому положенні ПДС (у це положення ДС6 переводиться до початку імітації АВ й у нього ДС6 повертається після завершення імітації АВ).

Крім того, для оцінки наявних конструктивних ресурсів ДС6 були запропоновані допустимі переміщення ПДС за лінійними степенями вільності на засадах концепції незалежної імітації АВ у залежності від поточного фазового стану ПДС й ПС [1, 2]. Завдяки цьому вдалося суттєво збільшити робочі діапазони переміщень ПДС, але конструктивний ресурс використовувався не повністю.

**Постановка завдання.** При досягненні граничного положення, хоча б одним гідроциліндром, переміщення ПДС за цим ступенем вільності неможливе без появи переміщення ПДС у протилежному напрямку або за іншим ступенем вільності. Однак, якщо при кутових переміщеннях ПДС наближати вісь обертання до гідроциліндра, який першим досягне граничного положення, можна зменшити переміщення цього гідроциліндра чи навіть звести його нанівець, якщо вісь обертання буде розташована у центрі обертання шарніру гідроциліндра. Значимо, що у цьому випадку гідроциліндри здійснюють складніший рух, ніж при традиційному підході.

Вісь обертання ПС знаходиться у центрі мас, що розташований на значній відстані від кабіни екіпажу. Імітовані АВ не досягають величин реальних АВ. Зміщення осей тангажу й рискання у напрямку центра мас ПС забезпечує приріст лінійних прискорень ПДС за рахунок кутових рухів. Тому, якщо гідроциліндри не досягли обмежень, то є можливість

змішувати координати осей тангажу  $x_\theta$  й рискання  $x_\psi$  вздовж поздовжньої осі  $OX$  таким чином, щоб вони наближалися до координати центра мас ПС  $x_{цм}$ :  $x_\theta \rightarrow x_{цм}$ ;  $x_\psi \rightarrow x_{цм}$ .

Підґрунтям для оцінки повноти використання конструктивних ресурсів ДС6 слугують допустимі переміщення ПДС, розраховані з урахуванням прийнятої схеми пріоритетів імітації АВ за степенями вільності. За лінійними степенями вільності оцінити конструктивні ресурси ДС6 дозволяють залежності допустимих лінійних переміщень ПДС за поздовжнім  $\bar{x}(\theta)$ , вертикальним  $\bar{y}(\theta)$  і поперечним  $\bar{z}(\theta)$  степенями вільності від кута тангажу, обчислені з урахуванням прийнятої схеми пріоритетів імітації АВ за степенями вільності [1], відповідно якої імітація АВ за лінійними степенями здійснюється незалежно, разом з АВ за поздовжнім ступенем вільності імітуються АВ за тангажем й рисканням, разом з АВ за вертикальним ступенем вільності імітуються АВ за тангажем й креном, разом з АВ за поперечним ступенем вільності імітуються АВ за тангажем, креном й рисканням:

$$\begin{aligned} \bar{x}(\theta) &\rightarrow \max x; \left( L_{гц} \in \Omega_1; -\theta^* \leq \theta \leq \theta^*; -\psi^* \leq \psi \leq \psi^* \right); \\ &L_{гц}, \psi, \theta \\ \bar{y}(\theta) &\rightarrow \max y; \left( L_{гц} \in \Omega_1; -\theta^* \leq \theta \leq \theta^*; -\gamma^* \leq \gamma \leq \gamma^* \right); \\ &L_{гц}, \psi, \theta \\ \bar{z}(\theta) &\rightarrow \max z; \left( L_{гц} \in \Omega_1; -\theta^* \leq \theta \leq \theta^*; \right. \\ &\left. -\gamma_\Sigma^* \leq \gamma_\Sigma \leq \gamma_\Sigma^*; -\psi^* \leq \psi \leq \psi^* \right); \\ &L_{гц}, \gamma_\Sigma, \psi, \theta \end{aligned}$$

де  $L_{гц}$  – вектор довжин гідроциліндрів  $L_{гц} = \{l_k, k=1, \dots, 6\}$ ;  $\Omega_1$  – область визначення довжин гідроциліндрів;  $x^*$ ,  $y^*$ ,  $z^*$ ,  $\gamma^*$ ,  $\psi^*$ ,  $\theta^*$  – відповідно робочі діапазони переміщень ПДС за поздовжнім, вертикальним і поперечним степенями вільності, креном, рисканням, тангажем.

Невикористаний конструктивний ресурс ДС6 визначається неузгодженістю між допустимим переміщенням ПДС (рис. 3 – 5, криві 1) і робочим діапазоном переміщення ПДС (рис. 3 – 5, криві 3) за цим же ступенем вільності.

Бажано, щоб конструктивний ресурс ДС6 використовувався повністю і значення допустимих переміщень ПДС дорівнювали значенням відповідних робочих діапазонів переміщень. Критерії оцінки конструктивних ресурсів ДС6 за поздовжнім, вертикальним і поперечним степенями вільності обчислюються за формулами:

$$J_x = \int_{-\theta^*}^{\theta^*} |\bar{x}(\theta) - x^*|^2 d\theta; \quad J_y = \int_{-\theta}^{\theta} |\bar{y}(\theta) - y^*|^2 d\theta;$$

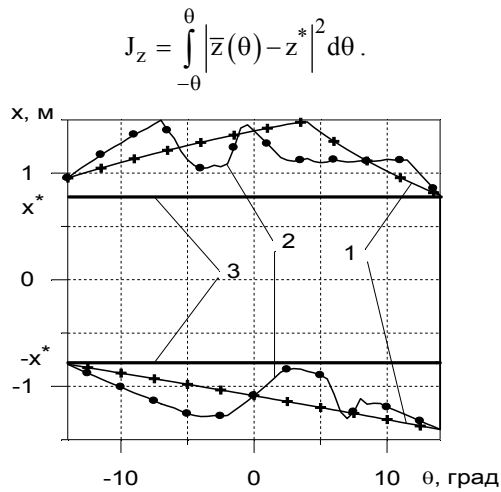


Рис. 3. Допустимі поздовжні переміщення ПДС: 1 – при нерухомих осях; 2 – при рухомих осях; 3 – робочий діапазон

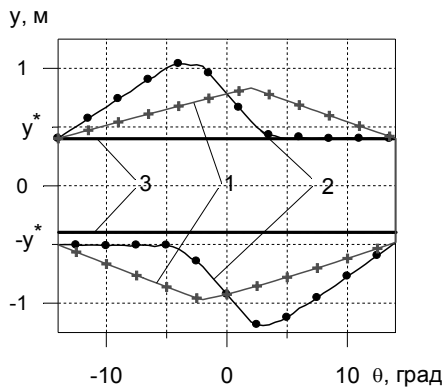


Рис. 4. Допустимі вертикальні переміщення ПДС: 1 – при нерухомих осях; 2 – при рухомих осях; 3 – робочий діапазон

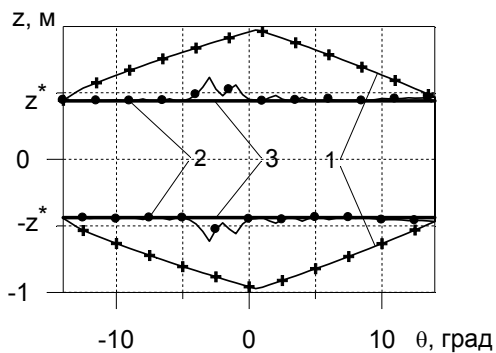


Рис. 5. Допустимі поперечні переміщення ПДС: 1 – при нерухомих осях; 2 – при рухомих осях; 3 – робочий діапазон

$$x_{\theta} = \begin{cases} x_{\theta}^- & \left| \theta \leq \theta_{\theta 1} = -\theta^* \right. \\ x_{\theta i} + \frac{x_{\theta(i+1)} - x_{\theta i}}{\theta_{\theta(i+1)} - \theta_{\theta i}} (\theta - \theta_{\theta i}) & \left. \theta_{\theta i} < \theta < \theta_{\theta(i+1)}, \right. \\ x_{\theta}^+ & \left. \theta \geq \theta_{\theta n \theta} = \theta^* \right. \end{cases} \quad \left. \begin{matrix} i = \overline{1, n_{\theta} - 1} \\ i = \overline{1, n_{\psi} - 1} \end{matrix} \right\}$$

### Виклад основного матеріалу дослідження

Аналіз координат осей тангажу й ристання, обчислених при визначенні робочих діапазонів переміщень ПДС (рис. 6, крива 2), показує, що вони суттєво відрізняються від координат аналогічних осей ПС (рис. 6, крива 1).

З іншого боку, як видно з рис. 2 – 4, конструктивний ресурс ДС6 використовується не повністю.

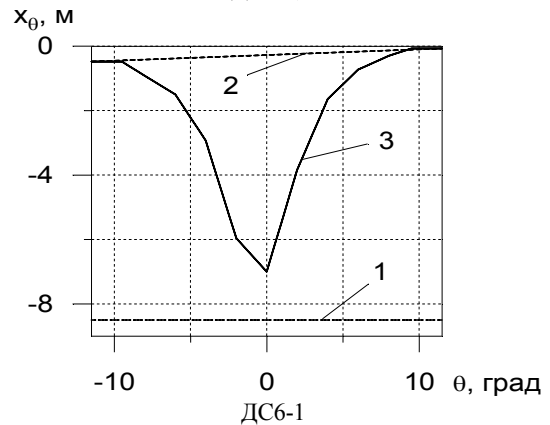
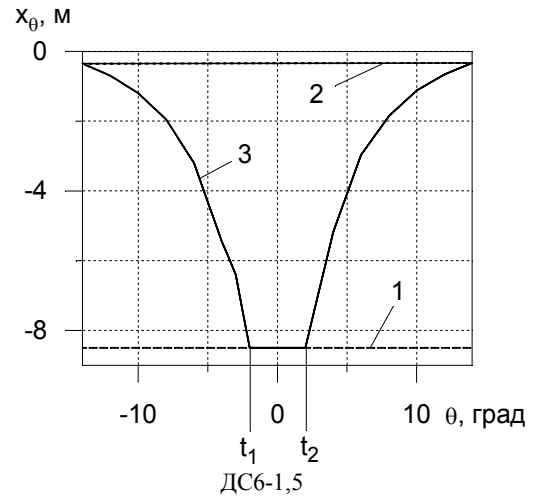


Рис. 6. Оптимальні залежності координат осі тангажу від кута тангажу

Для ефективного використання наявного конструктивного ресурсу ДС6 потрібно робочий діапазон тангажу ПДС  $[-\theta^*; \theta^*]$  розбити на підінтервали  $[\theta_{\theta i}; \theta_{\theta(i+1)}]$ ,  $i = \overline{1, n_{\theta} - 1}$  і  $[\theta_{\psi i}; \theta_{\psi(i+1)}]$ ,  $i = \overline{1, n_{\psi} - 1}$  й описати координати осей тангажу й ристання вздовж поздовжньої осі ОХ кусково-лінійними залежностями

$$x_{\psi} = \begin{cases} x_{\psi}^{-} & \left| \theta \leq \theta_{\psi 1} = -\theta^* ; \right. \\ x_{\psi i} + \frac{x_{\psi(i+1)} - x_{\psi i}}{\theta_{\psi(i+1)} - \theta_{\psi i}} (\theta - \theta_{\psi i}) & \left. \begin{array}{l} \theta_{\psi i} < \theta < \theta_{\psi(i+1)}, \\ i = \overline{1, n_{\psi} - 1}; \end{array} \right. \\ x_{\psi}^{+} & \left| \theta \geq \theta_{\psi n_{\psi}} = \theta^* ; \right. \end{cases}$$

де  $x_{\theta}$ ,  $x_{\psi}$  – відповідно координати осей тангажу і рискання ПДС;  $x_{\theta}^{-} = -\theta^*$ ,  $x_{\theta}^{+} = \theta^*$ ;

$\theta_{\theta i}$ ,  $\theta_{\psi i}$  – відповідно  $i$ -а точка розбиття робочого діапазону тангажу ПДС  $[-\theta^*; \theta^*]$  на підінтервали  $[\theta_{\theta i}; \theta_{\theta(i+1)}]$ ,  $i = \overline{1, n_{\theta} - 1}$  і  $[\theta_{\psi i}; \theta_{\psi(i+1)}]$ ,  $i = \overline{1, n_{\psi} - 1}$ ;  $i$  – індекс точки розбиття робочого діапазону тангажу ПДС;

$x_{\theta i}$ ,  $x_{\psi i}$  – відповідно координати осі тангажу в  $i$ -й точці розбиття робочого діапазону тангажу ПДС  $[-\theta^*; \theta^*]$  на підінтервали  $[\theta_{\theta i}; \theta_{\theta(i+1)}]$ ,  $i = \overline{1, n_{\theta} - 1}$  і  $[\theta_{\psi i}; \theta_{\psi(i+1)}]$ ,  $i = \overline{1, n_{\psi} - 1}$ ;

$n_{\theta}$ ,  $n_{\psi}$  – відповідно кількість точок розбиття робочого діапазону тангажу ПДС  $[-\theta^*; \theta^*]$  на підінтервали  $[\theta_{\theta i}; \theta_{\theta(i+1)}]$ ,  $i = \overline{1, n_{\theta} - 1}$  і  $[\theta_{\psi i}; \theta_{\psi(i+1)}]$ ,  $i = \overline{1, n_{\psi} - 1}$ ;

$x_{\psi}^{-}$ ,  $x_{\psi}^{+}$  – відповідно координати осі рискання ПДС, що відповідають межовим від'ємному  $-\theta^*$  і додатному  $\theta^*$  значенням робочого діапазону тангажу ПДС та вимагати їхнього зміщення у напрямку центра мас ПС.

При зміщенні осей тангажу і рискання вздовж поздовжньої осі ОХ можуть виникати паразитні прискорення ПДС, які сприймаються пілотами.

Для гарантування уникнення паразитних прискорень вводимо вектор динамічних характеристик ДСб  $q$  і допустиму область визначення динамічних характеристик ДСб  $\Omega_q$  і вимагатимемо щоб  $q$  знаходився у межах  $\Omega_q$ .

Тобто, задача визначення оптимальних залежностей  $\{x_{\theta}\}$  й  $\{x_{\psi}\}$  і відповідно оптимального використання конструктивних ресурсів ДСб зводиться до трьох екстремальних задач, що розв'язуються одночасно

$$\left| \bar{x}(\theta) - x^* \right| \rightarrow \min; \left( \begin{array}{l} L_{\Gamma\Omega} \in \Omega_1; \bar{x}(\theta) \geq x^*; x_{\theta}(\theta) \rightarrow x_{\text{ЦМ}}; \\ x_{\psi}(\theta) \rightarrow x_{\text{ЦМ}}; -\psi^* \leq \psi \leq \psi^*; \\ q \in \Omega_q \end{array} \right);$$

$$L_{\Gamma\Omega}, \bar{x}, x_{\theta}, x_{\psi}, \psi, q$$

$$\left| \bar{y}(\theta) - y^* \right| \rightarrow \min; \left( \begin{array}{l} L_{\Gamma\Omega} \in \Omega_1; \bar{y}(\theta) \geq y^*; x_{\theta}(\theta) \rightarrow x_{\text{ЦМ}}; \\ -\gamma^* \leq \gamma \leq \gamma^*, q \in \Omega_q \end{array} \right);$$

$$L_{\Gamma\Omega}, \bar{y}, x_{\theta}, \gamma, q$$

$$\left| \bar{z}(\theta) - z^* \right| \rightarrow \min; \left( \begin{array}{l} L_{\Gamma\Omega} \in \Omega_1; \bar{z} \geq z^*; x_{\theta} \rightarrow x_{\text{ЦМ}}; \\ x_{\psi} \rightarrow x_{\text{ЦМ}}; -\gamma_{\Sigma}^* \leq \gamma_{\Sigma} \leq \gamma_{\Sigma}^*; \\ -\psi^* \leq \psi \leq \psi^*; q \in \Omega_q \end{array} \right)$$

$$L_{\Gamma\Omega}, \bar{z}, x_{\theta}, x_{\psi}, \gamma_{\Sigma}, \psi, q.$$

Пошуковими є допустимі переміщення ПДС за лінійними степенями вільності та кусково-лінійні залежності координат осей тангажу і рискання від кута тангажу. Виходячи з практичних міркувань діапазон кутів тангажу розбивався з постійним кроком 2 градуси.

## Висновки

Результати проведених розрахунків наведені на рис. 3...5 (криві 2), рис. 6. Вони показують: за поздовжнім ступенем вільності є значний конструктивний ресурс, який не вдається повністю використати (між кривими 2 і 3 на рис. 3); активними є обмеження за вертикальним і поперечним степенями вільності; у ДСб-1,5 завдяки значному конструктивному ресурсу вісь тангажу зміщена у напрямку центра мас ПС в усьому діапазоні кутів тангажу ПДС, а у діапазоні кутів  $\pm 2$  градуса (між точками  $t1$  і  $t2$ ) співпадає з центром мас ПС (Ан-74ТК-200).

Проведені розрахунки переміщень і швидкостей найхарактерніших 2-го і 3-го гідроциліндрів ДСб-1,5 при синусоїдальному програмному сигналі амплітудою  $14^\circ$  і частотою 0,2 Гц, показують, що порівняно з традиційним підходом (рис. 7) при максимальному використанні конструктивних ресурсів ДСб (рис. 8): максимальні переміщення штоків гідроциліндрів змінилися мало: максимальне переміщення штоку 2-го гідроциліндра зросло на 18%, а 3-го – зменшилось на 19%; суттєво змінився характер переміщень штоків гідроциліндрів: при русі штоку 2-го гідроциліндра з'явилися полиці, а при русі штоку 3-го гідроциліндра з'явилися зміни напрямку руху; майже у 5 разів зросли максимальні швидкості руху гідроциліндрів.

Сформульована постановка задачі й запропоноване її рішення дозволило визначити оптимальні залежності координат осей тангажу і рискання й завдяки цьому ефективніше використовувати конструктивний ресурс ДСб для фізичного моделювання динамічних властивостей ПС на пілотажних стендах.

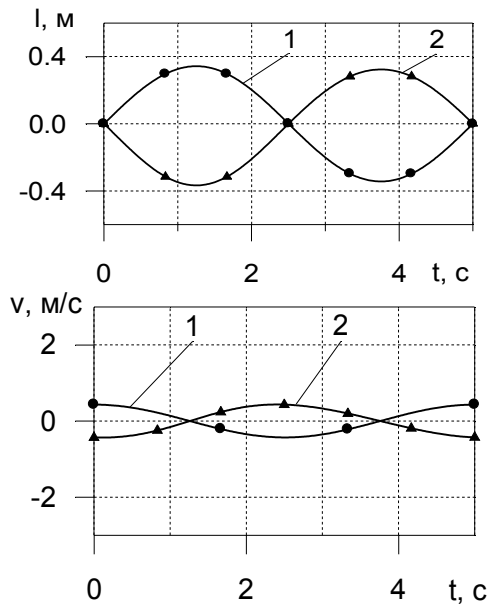


Рис. 7. Переміщення (l) і швидкість (v) штоків 2-го (1) і 3-го (2) гідроциліндрів ДС6-1,5 при русі за тангажем при традиційному підході

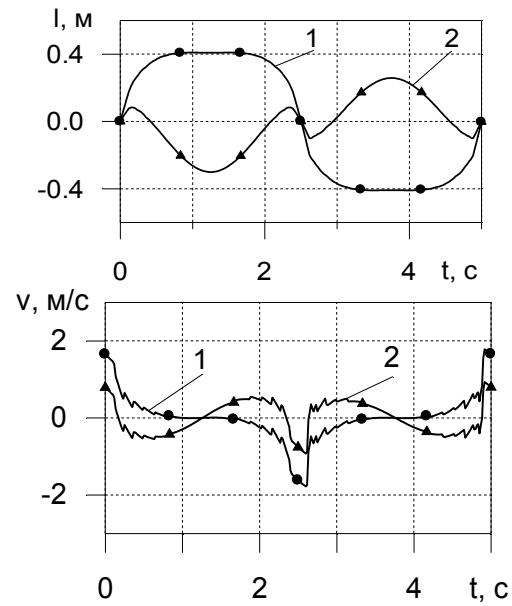


Рис. 8. Переміщення (l) і швидкість (v) штоків 2-го (1) і 3-го (2) гідроциліндрів ДС6-1,5 при русі за тангажем при оптимальних залежностях осей тангажу і рыскання

### Список літератури

1. Пат. 20060А Україна/ Спосіб управління приводними ланками шестиступеневого динамічного стенда опорного типу / Д.О. Сотніков, В.В. Кабанячий (Україна) – №95041711; Заявл. 14.04.95; Опубл. 25.12.97, Бюл. № 6.
2. Кабанячий В.В. Оптимизация управления шестистепенным динамическим стендом опорного типа авиационного тренажера / В.В. Кабанячий. – К.: КМУЦА, 1996. – 35 с. – Деп. в ГНТБ Украины 22.04.96, №982.

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

4. Кабанячий В.В. Допустимые и оптимальные рабочие диапазоны перемещений платформы шестистепенного динамического стенда / В.В. Кабанячий // Кибернетика и вычислительная техника. – 2002. – Вып. 136. – С. 61-68.

Надійшла до редколегії 4.01.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.І. Сидоренко, Інститут радіофізики та електроніки НАН України, Харків.

### ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПИЛОТАЖНЫМИ СТЕНДАМИ ПО ОСЯМ ТАНГАЖА И РЫСКАНИЯ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНОГО РЕСУРСА

В.К. Кабанячий

Приведена постановка задачі и методика определения оптимальных зависимостей координат осей тангажа и рыскания платформы шестистепенного динамического стенда в составе пилотажных стендов. Благодаря использованию схемы приоритетов имитации акселерационных воздействий по степеням свободы рассчитанные оптимальные зависимости координат осей тангажа и рыскания позволяют эффективнее использовать конструктивный ресурс шестистепенных динамических стендов для физического моделирования динамических свойств воздушных судов на пилотажных стендах и приблизить имитируемые акселерационные воздействия к реальным.

**Ключевые слова:** шестистепенной динамический стенд, пилотажный стенд, физическое моделирование динамических свойств воздушных судов.

### OPTIMUM CONTROL OF FLIGHT SIMULATOR ALONG PITCH AND YAW AXES TAKING INTO ACCOUNT STRUCTURAL RESOURCE

V.V. Kabanyachyi

Problem statement and finding technique of optimum dependences of pitch and yaw axes co-ordinates of six degree of freedom motion system of flight simulator within flight simulators is bring. Due to use of priority circuit of motion cueing along degrees of freedom the optimum dependences of pitch and yaw axes co-ordinates enable more effective use of structural resource of six degree of freedom motion system for physical modelling of aircraft dynamic properties on flight simulators and approach the motion cues to the real.

**Keywords:** six degree of freedom motion system, flight simulator, physical modelling of aircraft dynamic properties.