

УДК 629.736.072.8;681.3

В.В. Кабанячий

ОПТИМАЛЬНА ФУНКЦІЯ ПОЧАТКУ СПРИЙНЯТТЯ АКСЕЛЕРАЦІЙНИХ ДІЯНЬ З ОБМЕЖЕННЯМИ

Наведено фізичний зміст і математичний опис оптимальної функції початку сприйняття акселераційних діянь з обмеженнями для імітації руху на авіаційних тренажерах.

Через обмеженість робочих діапазонів переміщень платформи динамічного стенду (ПДС) авіаційного тренажера задача імітації дуже важливих для пілота акселераційних діянь (АД) полягає не у відтворенні рухів літального апарата, а у формуванні такого руху ПДС, у якому б АД, що сприймаються пілотом на тренажері, по характеру, часу виникнення, інтенсивності, напрямку й тривалості були б близькими до АД, що виникають у реальному польоті [1, 2]. Сприйняття АД виникає на підґрунті відображення акселераційних стимулів, які здійснюють діяння на рецептори вестибулярного аналізатора людини. Суто механічний підхід до вивчення рецепторів вестибулярного аналізатора дозволив скласти механічний опис окремих частин і математичну модель аналізатора у цілому. Проведені дослідження показали [3], що динаміку сприйняття людиною АД від акселераційних стимулів відображає модель сприйняття руху

$$\ddot{\Omega}_j = a_{0j} \times \dot{S}_j + a_{1j} \times \dot{\Omega}_j - a_{2j} \times \Omega_j,$$

де $\dot{\Omega}_j$ – друга похідна функції сприйняття руху (ФСР) за j -м ступенем вільності; j – індекс ступеня вільності: $j = 1$ – крен, $j = 2$ – ристання, $j = 3$ – поздовжній, $j = 4$ – поперечний, $j = 5$ – вертикальний; a_{0j} , a_{1j} , a_{2j} – коефіцієнти математичної моделі сприйняття АД за j -м ступенем вільності (відображають динаміку сприйняття АД від акселераційного стимулу); \dot{S}_j – акселераційний стимул за j -м ступенем вільності; $\dot{\Omega}_j$ – функція сприйняття кутових рухів, $j = 1, 2$; Ω_j – функція сприйняття лінійних рухів, $j = 3, 5$.

Ця модель враховує час затримки між діянням акселераційного стимулу й сприйняттям АД, що залежить від величини стимулу, і дозволяє отримувати кількісні оцінки сприйняття АД.

Для рецепторів вестибулярної системи людини характерна наявність специфічних утворень, що виконують функцію порогових пристроїв. Абсолютно нижній (фізичний) поріг чутливості рецепторів вестибулярного аналізатора являє собою мінімальне значення акселераційного стимулу, що викликає помітне відчуття руху. Нижче цього порога рух не сприймається. Існує також верхній поріг чутливості рецепторів. Інтервал між нижнім і верхнім порогом називається діапазоном чутливості. Завдяки різним адаптаціям діапазон чутливості рецепторів вестибулярного аналізатора людини досить великий. Крім фізичного порога існує диференційний поріг чутливості, що відображає здатність рецепторів вестибулярного аналізатора розрізняти два близькі за інтенсивністю акселераційні стимули. Наявність порогів сприйняття дозволяє імітувати АД у межах діапазонів переміщень ПДС значно менших відповідних діапазонів літального апарата. Це досягається поєднанням рухів ПДС вище й нижче порогу сприйняття АД.

Імітація АД складається з фаз розгону, слідкування, гальмування й повернення. У фазі розгону ПДС виводиться на задане значення градієнту прискорення, що забезпечує у заданий час сприйняття АД заданої інтенсивності й напрямку. У фазі слідкування ПДС рухається з постійним градієнтом прискорення до досягнення заданого прискорення, створюючи АД бажаної тривалості. У фазі гальмування градієнт прискорення ПДС поступово зменшується до нуля, а потім реверсується таким чином, щоб загальмувати ПДС за мінімальний час із прий-

нятною якістю руху, яка не дає можливості пілотові усвідомити реверсований рух. Повернення ПДС у вихідне положення здійснюється на допороговому рівні за сприйняттям АД.

Використання ФСР дозволило імітувати АД навіть на динамічному стенді з довжиною гідроциліндрів 1 м, але приводило до появи хибних АД. Останні були обумовлені тим, що у реальному польоті АД викликаються безперервно змінюваним полем сил, тоді як на тренажері при імітації АД є розриви у фазах гальмування й повернення. Щоб уникнути імітацію хибних АД, була запроваджена функція початку сприйняття АД з обмеженнями [4], яка дорівнює одиниці при виконанні умов сприйняття АД і можливості його імітації та дорівнює нулю у інших випадках. Апробація на тренажерах літаків Іл-96-300, Ту-204 і Ан-74ТК-200 показала високу ефективність цієї функції. Однак сама функція не мала ясного фізичного змісту й не була оптимальною. Спроба поліпшити її виявилася невдалою [5]. Розроблена ж функція має ясний фізичний зміст, оптимальна й позбавлена недоліків попередніх функцій.

Умовою сприйняття АД за значеннями фізичного порога є зростання модуля ФСР і досягнення ним фізичного порога, тобто поточний модуль ФСР повинен бути більше фізичного порога, а попередній – менший фізичного порога. Зміна ФСР у часі наведена на рис. 1, де точки t_1, t_2, t_4, t_5, t_6 кривих 1, 2, 3, 4, 5 відповідають сприйняттю АД за фізичним порогом. Для того, щоб ПДС не виходила за межі робочих діапазонів переміщень (через сумування переміщень ПДС одного знака), не імітується АД, якщо його знак збігається зі знаком останнього незавершеного циклу керування (точка t_3 кривої 1). Отже, функція початку сприйняття АД з обмеженнями дорівнює одиниці й АД імітується у тих випадках, якщо АД сприймається і є можливість його імітувати, та дорівнює нулю й АД не імітується у інших випадках:

$$\delta_{\Omega_j} = \begin{cases} 0 & \left| \delta_{\Omega_j} \right| < \Omega_{nj}; \\ 1 & \left| \Omega_j \right| \geq \Omega_{nj}, \bar{S}_j = \bar{V}_j; \\ 1 & \left| \Omega_j \right| \geq \Omega_{nj}, \bar{S}_j \neq \bar{V}_j, \end{cases}$$

де δ_{Ω_j} – функція початку сприйняття АД з обмеженнями за j -м ступенем вільності; Ω_{nj} – фізичний поріг сприйняття АД за j -м ступенем вільності; $\bar{S}_j = \text{sign} \Omega_j$ – знак ФСР за j -м ступенем вільності; \bar{V}_j – знак останнього циклу керування за j -м ступенем вільності.

Знак останнього циклу керування, час завершення останнього циклу керування й кількість циклів керування, які одночасно використовуються для імітації АД, розраховуються за формулами:

$$\bar{V}_j = \begin{cases} 0 & t = 0; \\ \bar{S}_j & \left| \Omega_j \right| < \Omega_{nj}, t \geq t_{uj}; \\ \bar{S}_j & \left| \Omega_j \right| \geq \Omega_{nj}, \bar{S}_j \neq \bar{V}_j; \\ \bar{V}_j & \left| \Omega_j \right| < \Omega_{nj}, t < t_{uj}; \\ \bar{V}_j & \left| \Omega_j \right| \geq \Omega_{nj}, \bar{S}_j = \bar{V}_j, \end{cases}$$

$$t_{uj} = \begin{cases} 0 & t = 0; \\ t_{uj} & \left| \Omega_j \right| < \Omega_{nj}; \\ t_{uj} & \left| \Omega_j \right| \geq \Omega_{nj}, \bar{S}_j = \bar{V}_j; \\ t + T_{uj} & \left| \Omega_j \right| \geq \Omega_{nj}, \bar{S}_j \neq \bar{V}_j, \end{cases}$$

$$n_j = \begin{cases} 0 & \left| \begin{array}{l} t = 0; \\ |\Omega_j| < \Omega_{nj}, t \geq t_{uj}; \end{array} \right. \\ n_j + 1 & \left| \begin{array}{l} |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, \bar{S}_j \neq \bar{V}_j; \\ |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, \bar{S}_j = \bar{V}_j; \end{array} \right. \\ n_j & \left| \begin{array}{l} |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, \bar{S}_j = \bar{V}_j; \\ |\Omega_j| < \Omega_{nj}, t < t_{uj}; \end{array} \right. \end{cases}$$

де t – поточний час; t_{uj} – час завершення останнього циклу керування за j -м ступенем вільності; T_{uj} – тривалість циклу керування за j -м ступенем вільності; n_j – кількість циклів керування, які одночасно використовуються для імітації АД за j -м ступенем вільності.

Сприйняття АД за диференціальним порогом виникає, якщо модуль ФСР перевищує фізичний поріг і модуль похідної ФСР, який характеризує інтенсивність сприйманого АД, досягає диференціального порога (попередній модуль похідної ФСР менше диференціального порога, а поточний – більше диференціального порога). При русі неманеврових літаків ці умови найчастіше виникають за вертикальним і поперечним ступенем вільності. Зміна ФСР у часі, що пояснює формування функції початку сприйняття АД за фізичним й диференціальним порогом наведена на рис. 2, де точки t_3, t_5 кривих 2, 3 відповідають сприйняттю АД за диференціальним порогом. Точки $t_1, t_2, t_6, t_7, t_8, t_{10}, t_{11}$ кривих 8, 1, 4, 5, 6 відповідають сприйняттю АД за фізичним порогом. Точка t_4 кривої 1 відповідає руху, який не сприймається, бо, хоча модуль похідної ФСР й досягає диференціального порога, модуль ФСР менше фізичного порога. Крива 2 відповідає руху, який не сприймається пілотом, бо, хоча модуль ФСР і більше фізичного порога, модулі похідної ФСР не досягають диференціального порога. Точка t_9 кривої 7 відповідає сприйняттю АД за фізичним порогом, але АД не імітується, оскільки знак ФСР співпадає зі знаком останнього циклу керування.

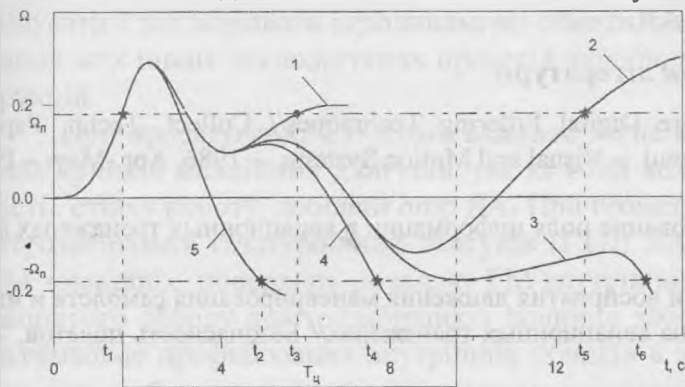


Рис. 1. Сприйняття АД за фізичним порогом

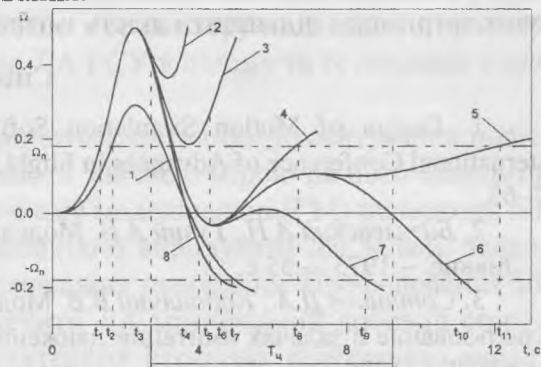


Рис.2. Сприйняття АД за фізичним й диференціальним порогом

Функція початку сприйняття АД з обмеженнями дорівнює одиниці й АД імітується у випадках, якщо сприймається АД за фізичним (модуль попередньої ФСР менше фізичного порога, а поточного – більше) або диференціальним порогом (модулі поточної й попередньої ФСР більше фізичного порога, модуль попередньої похідної ФСР менше диференціального порога, а поточної – більше) і є можливість його імітації та дорівнює нулю й АД не імітується у інших випадках

$$\delta_j = \begin{cases} 1 & \left| \begin{array}{l} |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, |\Omega_{j-1}| < \Omega_{nj}, \bar{S}_j \neq \bar{V}_j; \\ |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, |\Omega_{j-1}| \geq \Omega_{nj}, |\dot{\Omega}_{j-1}| < \dot{\Omega}_{nj}, |\dot{\Omega}_j| \geq \dot{\Omega}_{nj}, \bar{\beta}_j \neq \bar{V}_j; \end{array} \right. \\ 0 & \text{у інших випадках,} \end{cases}$$

де $\bar{\beta}_j$ – знак похідної ФСР за j -м ступенем вільності.

Знак останнього циклу керування, кількість циклів керування, які одночасно використовуються для імітації АД, час завершення останнього циклу керування обчислюються за формулами:

$$\bar{V}_j = \begin{cases} 0 & \left| \begin{array}{l} t = 0; \\ t \geq t_{uj}; \end{array} \right. \\ \bar{\beta}_j & \left| \begin{array}{l} |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, |\Omega_{j-}| \geq \Omega_{nj}, |\dot{\Omega}_{j-}| < \dot{\Omega}_{nj}, |\dot{\Omega}_j| \geq \dot{\Omega}_{nj}, \bar{\beta}_j \neq \bar{V}_j; \\ \bar{S}_j & \left| \begin{array}{l} |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, |\Omega_{j-}| < \Omega_{nj}, \bar{S}_j \neq \bar{V}_j; \\ \bar{V}_j & \text{у інших випадках,} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$n_j = \begin{cases} 0 & \left| \begin{array}{l} t = 0; \\ t \geq t_{uj}; \end{array} \right. \\ n_j + 1 & \left| \begin{array}{l} |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, |\Omega_{j-}| \geq \Omega_{nj}, |\dot{\Omega}_{j-}| < \dot{\Omega}_{nj}, |\dot{\Omega}_j| \geq \dot{\Omega}_{nj}, \bar{\beta}_j \neq \bar{V}_j; \\ |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, |\Omega_{j-}| < \Omega_{nj}, \bar{S}_j \neq \bar{V}_j; \\ n_j & \text{у інших випадках,} \end{array} \right.$$

$$t_{uj} = \begin{cases} 0 & \left| \begin{array}{l} t = 0; \\ \left| \begin{array}{l} |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, |\Omega_{j-}| \geq \Omega_{nj}, |\dot{\Omega}_{j-}| < \dot{\Omega}_{nj}, |\dot{\Omega}_j| \geq \dot{\Omega}_{nj}, \bar{\beta}_j \neq \bar{V}_j; \\ |\Omega_j| \geq \Omega_{nj}, |\Omega_{j-}| < \Omega_{nj}, \bar{S}_j \neq \bar{V}_j; \end{array} \right. \\ t_{uj} & \text{у інших випадках.} \end{array} \right. \\ t + T_{uj} & \end{cases}$$

Реалізація оптимальної функції початку сприйняття акселераційних діянь з обмеженнями у імітаторі АД комплексного тренажера літака Ан-74ТК-200 дозволила позбавитися часових затримок і підвищити якість імітації АД.

Список літератури

1. *Design of Motion Simulation Software Digital Filtering Techniques*// Collect. Techn. Pap. International Conference of Advances in Flight Simul. – Visual and Motion Systems. – 1986, Apr.-May. – P. 47–63.
2. *Базилевский А.Н., Гузий А.Н. Моделирование поля информации в авиационных тренажерах* // К.: Знание. – 1975. – 55 с.
3. *Сотников Д.А., Кабанячий В.В. Модели восприятия движения маневрирования самолета и их использование в задачах имитации движения на авиационных тренажерах*// Безопасность полетов. – К.: КИИГА, 1986. – С. 77–83.
4. *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., 1989. – 163 с.
5. *Разработка методики моделирования аэродинамических характеристик легких летательных аппаратов (ЛЛА) и компьютерной технологии подтверждения их летной годности. Разработка эскизно-технического проекта на пилотажный стенд как средство сертификации ЛЛА. Этап "Экспериментальная доводка разработанных способов имитации движения на пилотажном стенде. Описание законов управления"; Отчет о НИР/ Киев. междунар. ун-т гражд. авиации (КМУГА); Д.А.Сотников, В.В.Кабанячий. – № ГР0195U018103. – К., 1997. – 102 с.*

Стаття надійшла до редакції 06.07.01.