

DOI: 10.18372/2310-5461.41.13540

УДК 004.032.26 (045)

Ю. Б. Моденов, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-3898-4159
e-mail: modenov1951@gmail.com;

О. В. Гордуз
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-2568-8694
e-mail: alexander.gorduz@gmail.com

НЕЙРОАВТОПІЛОТ ПОВЗДОВЖНЬОГО КАНАЛУ ПОВІТРЯНОГО СУДНА

Вступ

Літальний апарат є багатозв'язною системою з різними нелінійностями. Використання класичної теорії управління призводить до необхідності розглядати лінеаризовані моделі, використовувати лінійні закони управління, спрощені дані, що знижує практичну значимість отриманих результатів. Відповідно, актуальною є задача створення систем управління повітряними суднами, що використовують нелінійні алгоритми управління.

Постановка завдання

Розробити математичну і програмну модель взаємодії повітряного судна (ПС), автопілота (АП), нейроавтопілота (НАП) для порівняння якості перехідних процесів ПС під управлінням АП та НАП в автоматичному режимі.

Аналіз досліджень та публікацій

Після двох десятиліть майже повного забуття, зацікавленість штучними нейронними мережами за останні кілька років швидко зросла. Фахівці з таких областей, як технічне конструювання, філософія, фізіологія і психологія, заінтриговані можливостями, наданими цією технологією, і шукають додатки їм поміж своїх дисциплін. Це відродження інтересу було викликане як теоретичними, так і прикладними досягненнями. У працях [1, 2] розглянуто можливість використання нейронних мереж в задачах управління позовдвжнім рухом літака за допомогою адаптивного управління з еталонною моделлю.

Мета даного дослідження

Розробити проект нейроавтопілота — системи покращення перехідних процесів в автоматичному режимі, для порівняння якості перехідних процесів під дією автопілота на нейроавтопілота.

Результати досліджень

Рух літального апарата, як твердого тіла складається із двох рухів: руху центра мас і руху навколо центра мас. Оскільки кожний із них має три степені вільності, то в цілому його рух

характеризується шістьма степенями вільності. При великих швидкостях у межах атмосфери, коли ЛА піддається впливу значних сил і моментів, починають виявлятися деформації, що впливають на аеродинаміку і призводять до зміни динамічних характеристик ЛА. У ряді випадків, розміщені усередині літального апарата тіла здійснюють заданий рух, тому ЛА необхідно розглядати як систему твердих тіл.

Лінеаризована математична модель позовдвжнього каналу ПС, адаптована під програмну реалізацію:

$$\begin{aligned}\ddot{\vartheta} &= -C_1\dot{\vartheta} - (C_2 + C_{17})\alpha - C_5\dot{\alpha} - E_3V - (C_3 + C_{18})\delta_v; \\ \dot{\theta} &= C_4\alpha + E_2V + C_9\delta_v; \\ \dot{\alpha} &= \dot{\vartheta} - \dot{\theta}; \\ \dot{V} &= -E_1V - C_8\alpha - C_7\vartheta + C_{19}\delta_r; \\ \dot{H} &= C_6\theta,\end{aligned}\tag{1}$$

де C_i, E_i — коефіцієнти, що залежать від параметрів руху і параметрів літака.

Найбільш простим є чисельний метод Ейлера. Ідеї, покладені в його основу, є, власне кажучи, вихідними для широкого класу чисельних методів. Рекурентне співвідношення для інтегрування диференціальних рівнянь має вигляд:

$$y_{i+1} = y_i + \dot{y}_i \Delta t,\tag{2}$$

де y_{i+1} — значення функції в $(i+1)$ -й та i -й, точках, \dot{y}_i — значення першої похідної функції в i -й точці, Δt — крок інтегрування.

Для дослідження динамічних характеристик ПС у позовдвжньому каналі, засобами мови програмування *Java* змодельована програмна модель повітряного судна (рис. 1). Для дослідження динамічних характеристик ПС у позовдвжньому каналі управління, при впливі на нього автопілота, засобами мови програмування *Java* змодельований автопілот, що доповнює модель ПС (рис. 2).

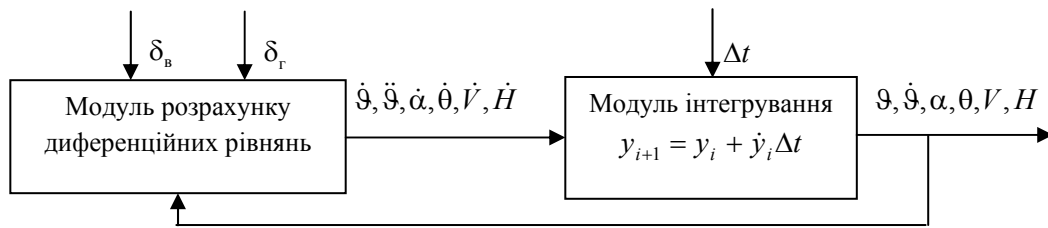


Рис. 1. Функціональна схема програмної моделі

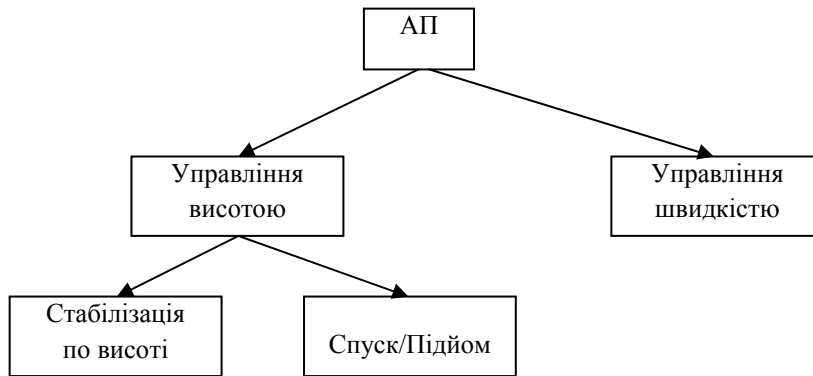


Рис. 2. Підсистеми автопілота

Після ввімкнення автопілота в поздовжньому каналі вмикається 2 підсистеми, які автоматично регулюють висоту польоту ПС і його швидкість. У свою чергу управління висотою поділяється на 2 режими: «Стабілізація» — режим стабілізації заданої барометричної висоти та режим «Спуск/Підйом» — автоматичний вихід на висоту польоту вказану екіпажем ПС. В моделі опущено режим «Узгодження» — безударного ввімкнення, адже модель до ввімкнення автопілота вже знаходиться в збалансованих або нульових (як для автопілота) значеннях.

Для управління рулем висоти ПС в режимі стабілізації за висотою («Стабілізація») використано такий закон управління [3]:

$$\delta_a = \Delta\theta K'_{\Delta\theta} + \Delta H K'_{\Delta H} + \dot{\theta} K'_{\dot{\theta}}, \quad (3)$$

де δ_a — величина кута відхилення площини руля висоти від його збалансованого значення; $\Delta\theta$ — різниця заданого і поточного кутів тангажу ($\Delta\theta = \theta - \theta_{зад}$); θ — поточне значення кута тангажу; $\theta_{зад}$ — задане значення кута тангажу; ΔH — різниця заданої і поточної висоти польоту ПС ($\Delta H = H - H_{зад}$); H — поточна висота польоту ПС; $H_{зад}$ — задана екіпажем висота польоту ПС; $K'_{\Delta\theta}$ — передаточне число автопілота за помилкою по тангажу в режимі «Стабілізація»; $K'_{\Delta H}$ — передаточне число автопілота за помилкою по висоті в режимі «Стабілізація»; $K'_{\dot{\theta}}$ — передаточне число автопілота по похідній кута тангажу.

Поточну висоту і кут тангажу отримуємо з математичної моделі ПС, задану висоту отримуємо з інтерфейсу автопілота, для визначення заданого кута тангажу введено модуль розрахунку $\theta_{зад}$, розрахунок проводиться на основі різниці по висоті та похідній по висоті (вертикальна швидкість), за наступним відношенням:

$$\theta_{зад} = -(\Delta H K_{\Delta H} + \dot{H} K_{\dot{H}}), \quad (4)$$

де \dot{H} — вертикальна швидкість; $K_{\Delta H}$ — передаточне число за помилкою по висоті модуля розрахунку заданого значення кута тангажу; $K_{\dot{H}}$ — передаточне число за вертикальною швидкістю модуля розрахунку заданого значення кута тангажу.

У режимі стабілізації висоти використовується лінійний закон управління з похідною кута тангажу, при цьому коливання мають мінімальну амплітуду та перерегулювання.

Для управління рулем висоти в режимі автоматичного виходу на задану висоту («Спуск/Підйом») використано наступний закон управління:

$$\delta_b = \Delta\theta K''_{\Delta\theta} + \frac{d\Delta\theta}{dt} K_{\Delta\dot{\theta}} + \Delta H K''_{\Delta H}, \quad (5)$$

де $K''_{\Delta\theta}$ — передаточне число автопілота за помилкою по тангажу в режимі «Спуск/Підйом»; $K_{\Delta\dot{\theta}}$ — передаточне число автопілота за похідною помилкою по тангажу в режимі «Спуск/Підйом»; $K''_{\Delta H}$ — передаточне число

автопілота за помилкою по висоті в режимі «Спуск/Підйом».

Для розрахунку заданого кута тангажу в режимі «Спуск/Підйом» треба вдатися до більш складного розрахунку — додати накопичувач помилки за висотою:

$$\vartheta_{\text{зад}} = -(\Delta H K_{\Delta H} + \dot{H} K_{\dot{H}} + K_{iH} \int_0^t \Delta H(t) dt), \quad (6)$$

де K_{iH} — передаточне число по накопиченій помилці по висоті; тут, інтеграл з проміжком інтегрування від 0 до t — часовий проміжок перехідного процесу в режимі «Спуск/Підйом».

Важливо зазначити важливість обнулення накопичувача відразу після закінчення перехідного процесу, адже не можна використовувати

накопичену раніше помилку по висоті для подальшого накопичення і використання.

Було запропоновано включити нейроавтопілот в контур управління по висоті (рис. 3), тобто включений нейроавтопілот охоплює основні функції по роботі у виробленні сигналів управління по стабілізації висоти на переходу на іншу висоту аналогічно розробленому автопілоту (без урахування контролю швидкості).

Для проведення дослідження впливу нейроавтопілота на перехідні процеси моделі поздовжнього каналу ПС, змодельємо дві ситуації: спуск та підйом на задану висоту, порівнюючи перехідні процеси по висоті між управлінням під дією автопілота та нейроавтопілота (рис. 4, 5, 6, 7).

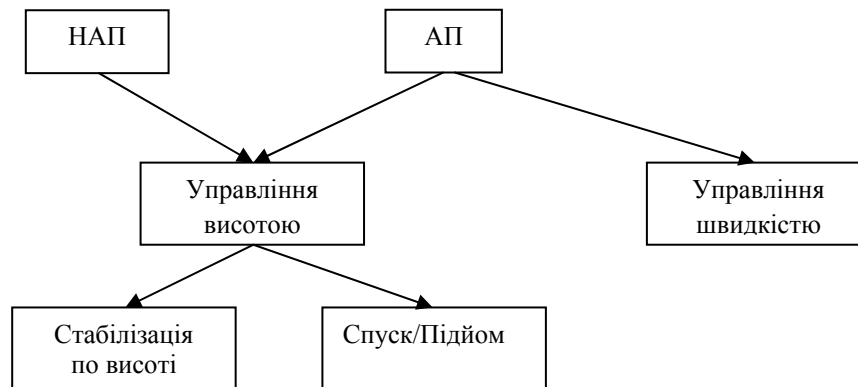


Рис. 3. Схема взаємодії автопілота та нейроавтопілота в контурі управління

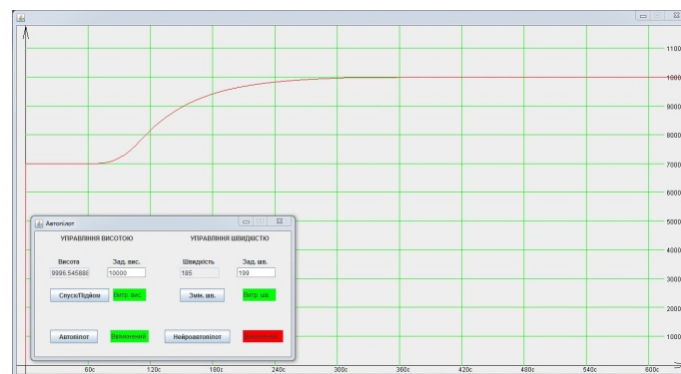


Рис. 4. Динаміка зміни висоти (підйом) під дією автопілота

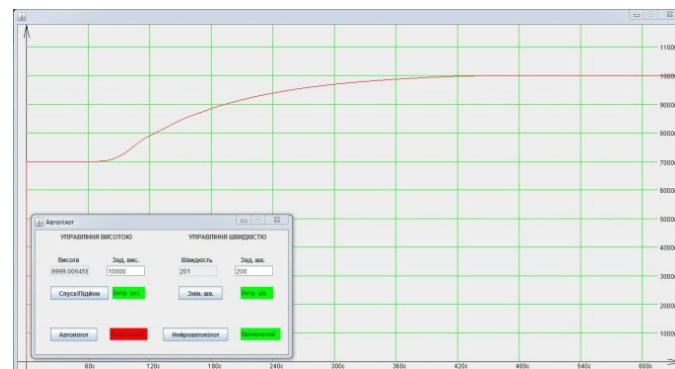


Рис. 5. Динаміка зміни висоти (підйом) під дією нейроавтопілота

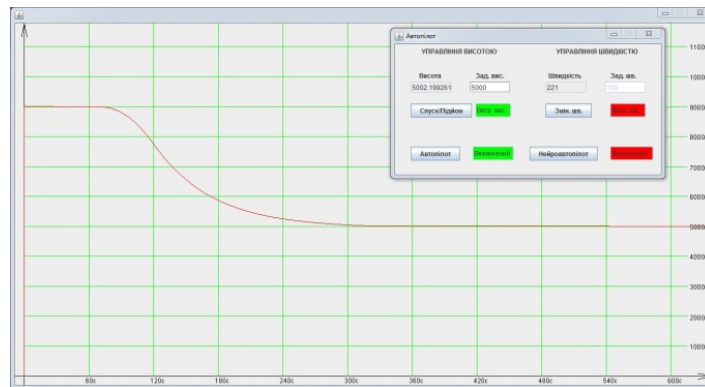


Рис. 6. Динаміка зміни висоти (спуск) під дією автопілота

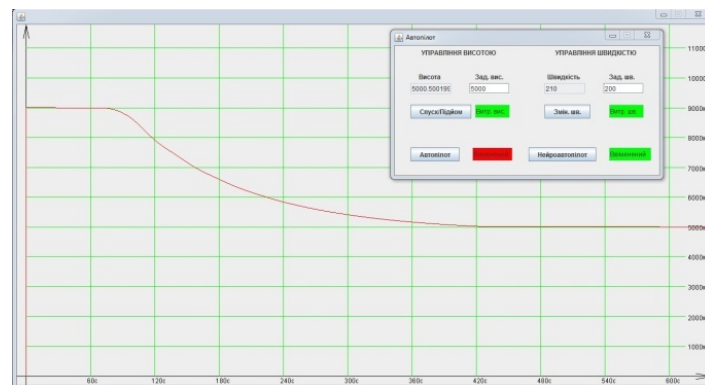


Рис. 7. Динаміка зміни висоти (спуск) під дією нейроавтопілота

Аналізуючи графіки перехідних процесів можемо дійти висновку, що літак під дією нейроавтопілота не тільки зменшує статичну помилку, а і істотно згладжує перехідний процес по висоті. Більш стабільний і згладжений перехідний процес підвищує безпеку авіаційних перевезень.

Недоліком даної конфігурації ваг в нейромережі є збільшення часу перехідного процесу, що на практиці можна максимально оптимізувати більш агресивним пілотуванням при навчанні мережі в штурвальному режимі, так нейронна мережа навчиться зменшувати час перехідного процесу з тим же рівнем комфорту, безпеки та статичної помилки.

Висновки

Було виконано зіставлення результатів моделювання динаміки зміни висоти польоту в автоматичному режимі при ввімкненні класичного автопілота та з задіяним нейроавтопілотом. Залежно від початкової конфігурації були отримані різні результати, які в процесі навчання доводяться до необхідних значень. Це дає можливість у достатньому діапазоні впливати на нейроавтопілот, роблячи його гнучкішим у використанні, а отже є можливість впливати на час перегулювання, запобігати виходу на

критичні кути, причому зменшуючи статичну помилку.

Проведені дослідження показують, що підхід до управління складними, нелінійними, динамічними системами в ситуаціях невизначеності, який реалізується з використанням адаптації, дає можливість системі управління пристосуватись до зміненню поточної ситуації, включаючи нештатні.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Васильев В. И.**, Ильясов Б. Г., Кусимов С. Т. Нейрокомпьютеры в авиации. М.: Радиотехника, 2004. 412 с.
2. **Кондратьев А. И.**, Тюменцев Ю. В. Нейросетевое адаптивное отказоустойчивое управление движением маневренного самолета // Нейроинформатика-2010. Сб. научн. трудов. Ч. 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 262–273.
3. **Андреевский Б. Р.**, Фрадков А. Л. «Современные направления синтеза систем автоматического управления летательными аппаратами» // Известия Академии наук. Теория и системы управления, 2004. № 2. С. 126–136.
4. **Лысенко Н. М.** Практическая аэродинамика маневренных самолетов. М., 1977. 246 с.
5. **Хайкин С.** Нейронные сети. М. : Вильямс, 2006. 983 с.
6. **Бураков М. В.** Генетический алгоритм: теория и практика. СПб.: ГУАП. 2008. 265 с.

Моденов Ю. Б. Гордуз О. В.

НЕЙРОАВТОПІЛОТ ПОВЗДОВЖНЬОГО КАНАЛУ ПОВІТРЯНОГО СУДНА

Використання класичної теорії управління призводить до необхідності розглядати лінеаризовані моделі, використовувати лінійні закони управління, спрощені дані, що знижує практичну значимість отриманих результатів. Відповідно, актуальною є задача створення систем управління повітряними суднами, що використовують нелінійні алгоритми управління. Після двох десятиліть майже повного забуття інтерес до штучних нейронних мереж швидко виріс за останні кілька років. Фахівці з таких областей, як технічне конструювання, філософія, фізіологія і психологія, зацікавлені можливостями, наданими цією технологією, і шукають застосування їм всередині своєї галузі. Це відродження інтересу було викликане як теоретичними, так і прикладними досягненнями. На сьогоднішній день розроблені робочі прототипи регуляторів заснованих на "чисто" нейронних мережах різних типів. Для дослідження динамічних характеристик повітряного судна у повздовжньому каналі управління, при впливі на нього автопілота, засобами мови програмування Java змодельований автопілот, що доповнює модель повітряного судна. Було запропоновано включити нейроавтопілот в контур управління по висоті, тобто включений нейроавтопілот охоплює основні функції по роботі у виробленні сигналів управління по стабілізації висоти при переході на іншу висоту аналогічно розробленому автопілоту (без урахування контролю швидкості). Для дослідження впливу нейроавтопілота на перехідні процеси моделі повздовжнього каналу повітряного судна, змодельовано дві ситуації: спуск на задану висоту, та підйом на задану висоту, порівнюючи перехідні процеси по висоті між управлінням під впливом автопілота та нейроавтопілота. На основі аналізу графіків перехідних процесів зроблено висновок, що літак під дією нейроавтопілота не тільки зменшує статичну помилку, а й істотно згладжує перехідний процес по висоті. Більш стабільний і згладжений перехідний процес підвищує безпеку авіаційних перевезень. Проведені дослідження показують, що підхід до управління складними, нелінійними, динамічними системами в ситуаціях невизначеності, який реалізується з використанням адаптації, дає можливість системі управління пристосовуватись до зміни поточної ситуації, включаючи нештатні.

Ключові слова: автопілот; нейроавтопілот; математична модель; модель повздовжнього каналу повітряного судна; перехідний процес.

Modenov Yu., Gorduz A.

NEUROAVTOPILOT OF THE LONGITUDINAL CHANNEL OF THE AIRCRAFT

The use of Classical Control Theory leads to necessity to consider linearized models, to use linear laws of control, the simplified data that reduces the practical importance of the results received. Accordingly, the problem of aircraft control systems creation is actual that uses nonlinear algorithms of control. After two decades of almost full oblivion, interest to artificial neural networks has quickly grown up for the last several years. Experts from such areas as technical design, Philosophy, Physiology and Psychology, are intrigued by the possibilities given by this technology, and are in search for its applications in directions of their interest. Such a revival of interest has been caused by both theoretical, and applied achievements. For today, the working prototypes of regulators of various types based on "purely" neural networks are developed. For research of dynamic characteristics of the aircraft in a longitudinal control channel, under influence of the autopilot on it, using programming language Java, the autopilot has been simulated that supplements the model of the aircraft. It was offered to include neuro-autopilot in a altitude control contour, that is the included neuro-autopilot covers the main functions on working out control signals on altitude stabilisation during transition to other altitude similar to developed autopilot (without speed control). To study the influence of neuro-autopilot on transient processes of model of the longitudinal channel of the aircraft, two situations are simulated: descent at the preset altitude, and ascent at the preset altitude, while making comparison of transient processes by altitude between autopilot control and neuro-autopilot control.

Analyzing the transient processes graphs, we can make a conclusion that the airplane under neuro-autopilot not only reduces a static error, but essentially makes smoother the transient by altitude. More stable and smooth transient process improves the safety of air transportation. The conducted research shows that the approach to control of complex, nonlinear, dynamic systems in situations of uncertainty which is realised with the use of adaptation, gives a chance to a control system to adapt to change of a current situation, including the supernumerary ones.

Keywords: the autopilot; neuro-autopilot; mathematical model; aircraft longitudinal channel model; transient process.

Моденов Ю. Б. Гордуз А. В.

НЕЙРОАВТОПІЛОТ ПРОДОЛЬНОГО КАНАЛА ВОЗДУШНОГО СУДНА

Использование классической теории управления приводит к необходимости рассматривать линейризованные модели, использовать линейные законы управления, упрощенные данные, что снижает практическую значимость полученных результатов. Соответственно, актуальной является задача создания систем управления воздушными судами, которые используют нелинейные алгоритмы управления. После двух десятилетий почти полного забвения интерес к искусственным нейронным сетям быстро вырос за последние

несколько лет. Специалисты из таких областей, как техническое конструирование, философия, физиология и психология, заинтригованы возможностями, предоставленными этой технологией, и ищут приложения им внутри своих направлений. Это возрождение интереса было вызвано как теоретическими, так и прикладными достижениями. На сегодняшний день разработаны рабочие прототипы регуляторов основанных на "чисто" нейронных сетях различных типов. Для исследования динамических характеристик воздушного судна в продольном канале управления, при воздействии на него автопилота, средствами языка программирования Java смоделирован автопилот, дополняющий модель воздушного судна. Было предложено включить нейроавтопилот в контур управления по высоте, то есть включенный нейроавтопилот охватывает основные функции по работе в выработке сигналов управления по стабилизации высоты при переходе на другую высоту аналогично разработанному автопилоту (без учета контроля скорости). Для исследования влияния нейроавтопилота на переходные процессы модели продольного канала воздушного судна, смоделированы две ситуации: спуск на заданной высоте, и подъем на заданную высоту, сравнивая переходные процессы по высоте между управлением под влиянием автопилота и нейроавтопилота.

Анализируя графики переходных процессов, можем сделать вывод, что самолет под действием нейроавтопилота не только уменьшает статическую ошибку, а и существенно сглаживает переходный процесс по высоте. Более стабильный и сглаженный переходный процесс повышает безопасность авиационных перевозок. Проведенные исследования показывают, что подход к управлению сложными, нелинейными, динамическими системами в ситуациях неопределенности, который реализуется с использованием адаптации, дает возможность системе управления приспособляться к изменению текущей ситуации, включая нештатные.

Ключевые слова: автопилот; нейроавтопилот; математическая модель; модель продольного канала воздушного судна; переходный процесс.

Стаття надійшла до редакції 17.12.2018 р.

Прийнято до друку 22.01.2019 р.