УДК 681.51:656.7.071.7:351.814.263.2(045)

К. В. Приходько

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КВАЗІПРЕДМЕТНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕРТОЛЬОТОМ ДЛЯ НАВЧАННЯ ПІЛОТІВ

Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: iacs@nau.edu.ua

Розглянуто принципи побудови існуючих систем керування літальними апаратами і запропоновано квазіпредметний спосіб керування та навчання пілотів.

Ключові слова: пілот, система керування, вертоліт, рукоятка керування.

Вступ. Професія пілота пов'язана зі значними ризиками. Крім володіння і керування технікою, пілот повинен мати відповідні вольові та емоційні якості, ґрунтовну теоретичну підготовку, а також наліт годин для отримання ліцензії. Опанування професії потребує значних затрат праці, часу та матеріальних ресурсів.

Статистика показує, що більша частина авіаційних пригод країн СНД відбувається з участю вертольотів, причому 80 % з них на технічно справних вертольотах через помилки екіпажу. Це свідчить про незадовільну підготовку екіпажу і невміння правильно оцінити ситуацію та прийняти рішення.

Тренажери різноманітної складності дозволяють відпрацьовувати від 50 до 90 % практичних завдань навчання і підготовки екіпажів [1]. Застосування тренажерів – економний шлях підготовки льотного складу.

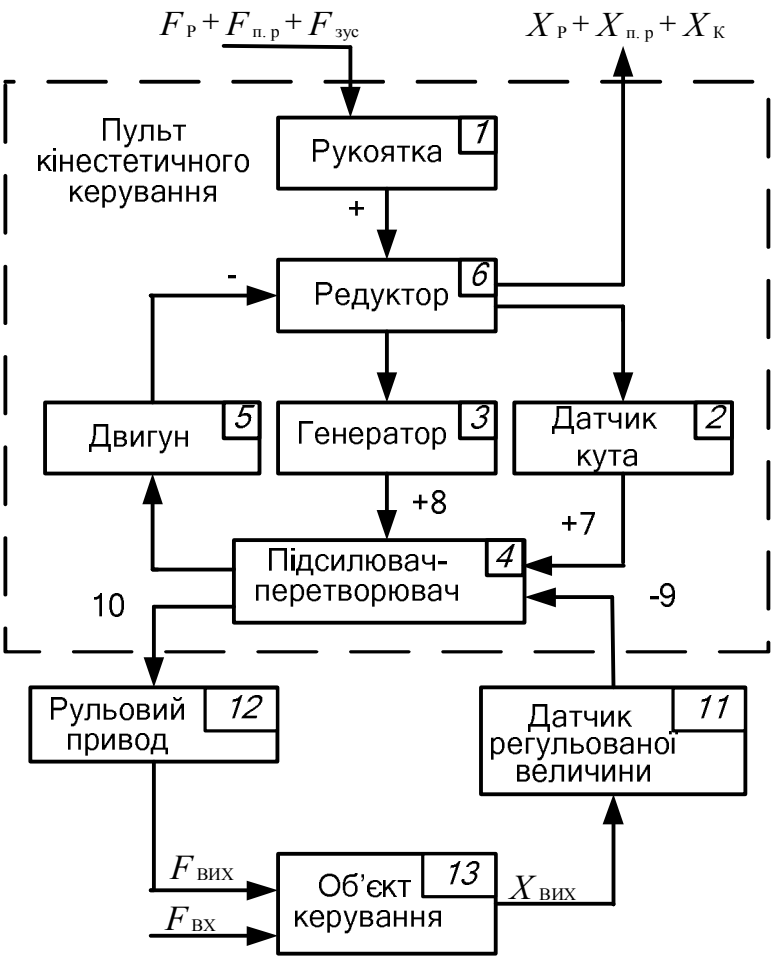
Постановка проблеми. Вертоліт є нестійким як об'єкт керування. Стабілізація його положення протягом багатьох годин потребує постійної уваги пілота. У процесі ручного керування відбувається розподілення уваги пілота, яке призводить до дискретності сприйняття інформації, що, у свою чергу, може стати причиною авіаційної пригоди.

Аналіз існуючих систем керування виявляє їх недоліки. Зв автоматичної стабілізації заданого кутового положення наявна динамічна помилка контуру відпрацювання сигналу. Для уникнення динамічних помилок застосовують систему сумісного керування. Але у цьому випадку керування відтворює керувальний вплив пілота з динамічними помилками, оскільки є труднощі в реалізації зворотної передатної функції об'єкта керування. У зв'язку з цим пілот вимушений користуватись методом проб і помилок із використанням набутого досвіду під час керування. Це є досить довготривалий і небезпечний процес.

Тому виникає потреба у розробленні систем керування, які б дозволяли якісніше виконувати цільові завдання польоту без значного навантаження на зір та увагу пілота. Удосконалення також потребують існуючі тренажери для навчання і підготовки пілотів. Є потреба у створенні тренажера, що давав би змогу набути навиків керування вертольотом більш якісно і за менший період часу. Пропонується застосовувати систему, що використовує предметні навики людини.

Квазіпредметна система керування. Недоліків сумісного керування можна уникнути, застосовуючи квазіпредметну систему керування [2]. Вона є поєднанням ручної і напівавтоматичної системи, які працюють узгоджено і координовано. У цій системі рукоятка керування моделює динаміку вертольота, тобто під дією зусилля, прикладеного до рукоятки, вона рухається так, як вертоліт під дією зусилля, прикладеного до штурвала ручної системи. [3]. Це дає змогу розвантажити увагу і зір пілота для виконання цільових завдань польоту.

Пульт ручного керування і стабілізації виконує функцію створення кінестетичного покажчика регульованої величини руху ЛА, суміщеного з датчиком керувальних впливів оператора. Структурну схему квазіпредметної системи показано на рисунку.



Структурна схема квазіпредметної системи: $F_{вх}$ – збурювальний вплив; $F_{вих}$ – регулювальний вплив; $X_{вих}$ – регульована величина; $X_р$ – зсув рукоятки выдносно нейтрального положення; $X_{п.р}$ – переміщення нейтрального положення рукоятки; $X_к$ – компенсувальні зусилля; $F_р$ – керувальне зусилля оператора на рукоятку; $F_{п.р}$ – додаткове зусилля оператора; $F_{зус}$ – зусилля з боку рукоятки

Керувальне зусилля оператора на рукоятку керування $F_р$ викликає зсув рукоятки відносно нейтрального положення $X_р$, що виміряється датчиком кутового положення рукоятки *2*. Сигнал з датчика підсилюється за напругою і потужністю підсилювачем-перетворювачем *4* і подається на двигун *5*, що створює протидійний момент зрівноваження зусилля оператора. Одночасно сигнал зсуву рукоятки після підсилювача подається на виконавчий пристрій, що створює регулювальний вплив на об'єкт. Величину зсуву рукоятки $X_р$ відносно нейтралі під дією зусилля оператора можна зробити малою шляхом збільшення коефіцієнта підсилення підсилювача. Виникаюче при цьому погіршення стійкості може бути скомпенсовано сигналом з генератора *3*. Сигнал зміни регульованої величини об'єкта з датчика регульованої величини подається на інший вхід *9* підсилювача-перетворювача зі знаком протилежним знаку сигналу з датчика кутового положення рукоятки. Замкнута система регулювання положення рукоятки відтворює регульовану величину об'єкта у вигляді змінного нейтрального положення рукоятки $X_{п.р}$.

Якщо зміна регульованої величини об'єкта викликана зусиллям оператора, то наступна система повертає рукоятку в бік цього зусилля. З початком зміни нейтрального положення

рукоятки оператор створює додаткове зусилля $F_{\text{п. р}}$, пропорційне швидкості зміни нейтрального положення, яке синхронізує зміна нейтрального положення рукоятки зі зміною регульованої величини об'єкта $X_{\text{вих}}$.

Якщо зміна регульованої величини викликана збуренням, то рукоятка прагне повернутися у бік збурення. Утримуючи рукоятку нерухомою, оператор буде створювати регулювальний вплив на об'єкт, що компенсує збурення, і відчувати зусилля $F_{\text{зус}}$ з боку рукоятки на руку, пропорційне збуренню. Таким чином, рукоятка керування може передавати руховому аналізатору людини інформацію про регульовану величину і збурювальний вплив.

Керувальний вплив у пропонованій системі (за умови нехтування перехідними процесами в пульті керування і виконавчому пристрої) можна вважати пропорційним регулювальному впливу $F_{\text{вих}}$:

$$F_{\text{вих}} = K_F F_{\text{р}}, \tag{1}$$

де K_F – коефіцієнт пропорційності.

Нейтральне положення рукоятки $X_{\text{п. р}}$ змінюється пропорційно до регульованої величини об'єкта:

$$X_{\text{п. р}} = KX_{\text{вих}}, \tag{2}$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

Зв'язок між регульованою величиною і регулювальним впливом визначається передатною функцією об'єкта $W_{\text{о}}$:

$$X_{\text{вих}} = W_{\text{о}} X_{\text{вих}}.$$

Підставивши в рівняння значення $X_{\text{вих}}$ і $F_{\text{вих}}$ із рівнянь (1) і (2), знаходять результуючий зв'язок між зусиллям оператора $F_{\text{р}}$ і переміщенням нейтрального положення рукоятки $X_{\text{п. р}}$. Він також визначається передатною функцією об'єкта:

$$X_{\text{па}} = F_{\text{р}} K_F K W_{\text{о}}. \tag{3}$$

Рівняння (3) доводить те, що в запропонованій системі рукоятка керування моделює динаміку об'єкта керування.

Застосування квазіпредметної системи для керування вертольотом. Ця система ручного керування і стабілізації була відтворена методом напівнатурного моделювання. Як об'єкт керування моделювався поздовжній і боковий рухи вертольота Мі-6.

Пульт керування виконується шляхом виконання стрілки покажчика регульованої величини у формі рукоятки керування датчика керувальних впливів оператора і суміщенням стрілки з рукояткою.

Для об'єднання ручної і напівавтоматичної системи перейшли до електродистанційної системи ручного керування; рукоятку дистанційного керування замінили на пропонований пульт. Пульт був з'єднаний з виконавчим контуром системи за схемою оборотної слідкувальної системи керування: вихід підсилювача-перетворювача пульта з'єднали з рульовим приводом; вихід датчика регульованої величини з'єднали з виходом підсилювача-перетворювача пульта.

Для розроблення пропонованого пульта керування були виконані рульова машина і магнітний підсилювач-перетворювач потужності автопілота ВУАП-1 вертольота Мі-24. Як

загальний підсумувальний підсилювач контурів рукоятки і об'єкта використовується підсилювач-перетворювач постійного струму.

Пульт керування за допомогою цифро-аналогового та аналого-цифрового перетворювачів здійснюється двосторонній зв'язок з комп'ютером по чотирьох каналах керування: тангаж, крен, рискання і вертикальна швидкість. Спеціально розроблене програмне забезпечення виводить інформацію про об'єкт керування у вигляді пілотажних приладів (авіагоризонт, варіометр, вказівник курсу) і є цифровою моделлю динаміки вертольота Мі-6. Програмне забезпечення дозволяє в реальному часі слідкувати за перехідним процесом вертольота як об'єкта керування за інформацією індикаторів, виконувати керування в ручному режимі, а також виводити графік перехідного процесу системи. Таку установку можна використовувати як тренажер для навчання пілотів.

Як критерій точності оцінки пульта обрано величину статичної помилки відтворення за максимального керувального впливу оператора і величину перерегулювання перехідного процесу при знятті керувального впливу.

Операторами для випробування способів керування і стабілізації були обрані професіонал–інженер систем керування вертольотом і непрофесіонал – учень середньої школи. Участь у випробуваннях професіоналів дозволило скоротити кількість тренувальних проб до чотирьох. П'ята проба була остаточною. Участь непрофесіонала диктувалась необхідністю виявлення можливостей керування пропонованою системою на основі навиків предметного керування. Перед випробуваннями оператори були ознайомлені з діапазонами керувальних впливів і законом керування.

Системи керування вертольотом з рискання і тангажа були випробувані в програмному керуванні. Задана програма зміни кута тангажа чи рискання була створена з двох полікосинусоїд одного періоду і різних амплітуд. Збурювального впливу не відбувається.
Критерій точності стабілізації вертольота за кутами крена і рискання – максимальні відхилення по цих кутах. Результати оцінки процесів керування наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Дослідження програмного керування кутами тангажа і рискання

Спосіб керування	Номер оператора	Критерії точності	
		$\Delta\gamma_{max}$, град.	$\Delta\psi_{max}$, град.
Існуючий ручний спосіб	Оператор 1	11,2	7,44
	Оператор 2	8	9,6
Пропонований ручний спосіб	Оператор 1	0	0
	Оператор 2	0, 5	0,8

З наведених даних випливає, що стабілізація кутового положення в боковому каналі пропонованим ручним способом є точнішою, ніж існуючим ручним способом, можлива стабілізація без помилок. Можна зробити висновок, що оператор непрофесіонал досить добре справився із поставленим завданням, зважаючи на малий час для опанування системи і відсутність досвіду пілотування.

Критерії точності розвороту на задані кути по крену і рисканню одночасно – відхилення від заданого значення кутового положення наприкінці розвороту ($\Delta\gamma_k, \Delta\psi_k$) і

максимальне значення повертального руху під час розвороту ($\Delta\gamma_{max}, \Delta\psi_{max}$). Результати досліджень точності виведення вертольота в задане положення наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати оцінювання точності виведення вертольота в задане кутове положення

Спосіб керування	Критерії точності			
	$\Delta\psi_k$	$\Delta\psi_{max}$	$\Delta\gamma_k$	$\Delta\gamma_{max}$
Існуючий ручний спосіб	2,24	8,8	2	5,2
Пропонований ручний спосіб	0,64	0	2	0

Точність виведення вертольота в задане кутове положення пропонованим ручним способом в декілька разів вища, ніж існуючим ручним способом керування.

Критерій точності програмного керування вертольотом за кутами тангажа і рискання були вибрані відхилення амплітуд і півперіодів великого та малого коливань від заданих програмних значень $A_в$, $A_м$, $T_в/2$, $T_м/2$. Оцінку процесів програмного керування за кутом рискання наведено в табл. 4, а за кутом тангажа – у табл. 3.

Таблиця 3

Результати оцінки процесів програмного керування по куту тангажа

Величина	Пропонована система ручного керування				Існуюча система ручного керування			
	$A_в$, град	$A_м$, град	$T_в/2$, с	$T_м/2$, с	$A_в$, град	$A_м$, град	$T_в/2$, с	$T_м/2$, с
Задана	2	1	4	4	2	1	4	4
Регу-льована	1,8	0,5	4,8	3,2	2,72	2,64	4,6	2,4
Помилка	0,2	0,5	-0,8	0,8	-0,72	-1,64	-0,6	1,6

Із наведених даних можна зробити висновок, що програмне керування пропонованим ручним способом у 2–3 рази точніше, ніж існуючим ручним чи сумісним способами.

Отже, пропонована система ручного керування дозволяє збільшити в декілька разів точність виведення вертольота в задане кутове положення, а також точність стабілізації в початковому положення. Це дозволяє пілоту вирішувати завдання більш високого класу за менший час з меншими затратами на керування: ресурсу техніки, витрати палива тощо.

Навчитись керувати вертольотом за допомогою заданої системи можна досить швидко навіть не маючи досвіду керування літальними апаратами.

Квазіпредметна система є повноцінною системою керування, яка може застосовуватись як на літальних апаратах, так і на будь-яких інших об’єктах. На жаль, нововведення досить складно втілювати в життя, тому рекомендується застосовувати систему для навчання пілотів на тренажерах літальних апаратів.

Слід зазначити, що після тренування на квазіпредметній системі оператор точніше відтворював програмно заданий вплив за допомогою існуючої системи. Оператор швидше набував навиків програмного керування навіть без попередньої підготовки.

Натепер досліди з використанням квазіпредметної системи проводились лише на аналоговому обладнанні. Напрямом подальших досліджень є створення цифрового стенда моделювання динаміки вертольота і вдосконалення програмного забезпечення для відображення пілотажних параметрів.

Висновки. Створення досконалих тренажерів дасть змогу зменшити витрати на підготовку пілотів. Для відпрацювання навичок пілотування в складних умовах пропонується застосовувати тренажер квазіпредметної системи, що дозволяє швидше і якісніше засвоїти навики керування за заданим законом. Точність цієї системи підтверджується проведеними дослідами. Процес керування значно спрощується, адже квазіпредметне керування використовує навики предметного керування, які є у всіх людей. Ці навики відповідають високопрофесійним навикам програмного керування за розімкненою схемою з апріорним знанням динаміки вертольота, які здобувають пілоти у процесі самонавчання і льотної практики.

Список літератури

1. *Володко, А. М.* Использование комплексных тренажеров для обучения и подготовки экипажей вертолетов действиям в особых ситуациях полета // Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития авиационного тренажеростроения». – М.: ЦАГИ, 2007. – С. 75–81.
2. *Кашматов, В. И.* Квазипредметная система управления продольным движением самолета / В. И. Кашматов // Електроніка та системи управління. – К.: НАУ, 2005. – №1. – С. 65–79.
3. *Пат. 26286* Україна, МПК B64C 13/00 (2006.01) Пульт, система та спосіб ручного керування та стабілізації регульованої величини руху літального апарата «Аржесан» / Кашматов В. Й. (Україна) – №95083813; заявл.15.08.95; опубл. 19.07.99, Бюл. №4. – 85 с.

Е. В. Приходько

Возможности применения квазипредметной системы управления вертолетом для обучения пилотов

Рассмотрены принципи построения существующих систем управления летательными аппаратами и предложен квазипредметный способ управления и обучения пилотов.

K. V. Prykhodko

Possibilities of application of quasi-object helicopter's control system for pilot training

The article deals with the principles of construction of the existing aircraft control systems. A quasi-object method of control and training is suggested.