

Информатика и информационные технологии

DOI: [https:// 10.15407/kvt195.01.005](https://10.15407/kvt195.01.005).

УДК 681.513

ГРИЦЕНКО В.І., член-кореспондент НАН України,
директор Міжнародного науково-навчального центру
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України
e-mail: vig@irtc.org.ua

ВОЛКОВ О.Є., в.о. завідувача відділу,
відд. інтелектуального управління
e-mail: alexvolk@ukr.net

КОМАР М.М., наук. співроб.,
відд. інтелектуального управління
e-mail: nickkomar08@gmail.com

ШЕПЕТУХА Ю.М., канд. техн. наук,
пров. наук. співроб.,
відд. інтелектуального управління
e-mail: dep185@irtc.org

ВОЛОШЕНЮК Д.О., наук. співроб.,
відд. інтелектуального управління
e-mail: dep185@irtc.org
Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова 40, м. Київ, 03187, Україна

ІНТЕГРАЛЬНО-АДАПТИВНИЙ АВТОПІЛОТ ЯК ЗАСІБ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ СУЧАСНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ПІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

***Вступ.** Сучасні безпілотні літальні апарати (БпЛА) успішно використовують в різних галузях під час виконання науково-технічних, економічних, військових і ряду інших місій. Ефективність функціонування БпЛА визначається бортовим комплектом апаратних засобів та програмного забезпечення системи керування БпЛА. Процес удосконалення наявних систем керування має на меті розширення спектру завдань, які розв'язуються за допомоги БпЛА без безпосереднього залучення людини та запровадження додаткових інтелектуальних функцій в роботу автопілота.*

***Метою дослідження** є створення нового методу інтелектуального керування БпЛА та його впровадження на прикладі розробленого інтегрально-адаптивного автопілота БпЛА.*

© ГРИЦЕНКО В.І., ВОЛКОВ О.Є., КОМАР М.М., ШЕПЕТУХА Ю.М., ВОЛОШЕНЮК Д.О. 2019

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). Cyb. and comp. eng. 2019. № 1 (195)

Результати. В роботі досліджено алгоритми керування, які використовують в автопілотах сучасних безпілотних літальних апаратів, а також розглянуто питання створення та застосування нових інтелектуальних методів і систем автоматичного пілотування безпілотного літального апарату. Запропоновано інтегрально-адаптивний автопілот для реалізації складного просторового маневрування безпілотного літального апарату. Описано підхід до розв'язання завдання керування безпілотним літальним апаратом у класі віртуальних стратегій з використанням віртуального керування, що дає можливість досліджувати об'єкт керування комплексно без спрощень і лінеаризації системи рівнянь, які його описують.

Висновки. Використання методу, запропонованого в статті, дає змогу створювати адаптивні автопілоти для виконання складних просторових маневрувань безпілотного літального апарату, динаміка руху якого описується повними нелінійними системами рівнянь.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, система керування, віртуальне керування, адаптація, інваріантність.

ВСТУП

Сьогодні безпілотні літальні апарати (БПЛА) успішно застосовують в різних галузях під час розв'язання науково-технічних, економічних, сільсько-господарських та військових завдань. Ефективність функціонування БПЛА багато в чому визначається їхніми бортовими комплексами апаратних і програмних засобів керування. Одним з таких засобів є автопілот БПЛА. Він, зазвичай, реалізується інтегрованою авіонікою з використанням єдиної обчислювальної платформи. Сучасний шлях розвитку бортових обчислювальних платформ передбачає імплементацію алгоритмів керування за допомоги програмних модулів, написаними мовами програмування високого рівня. До апаратної частини автопілотів БПЛА висуваються вимоги щодо обчислювальної потужності, яка повинна бути достатньою для реалізації алгоритмів керування [1–3].

Серед багатьох завдань, які ставлять перед автопілотами БПЛА, можна виокремити ряд таких, що стосуються розв'язання завдань цієї статті:

- забезпечення автономного польоту БПЛА за певним набором заданих точок і цільових зон простору в автоматичному режимі без втручання оператора;
- стабілізація заданих значень параметрів літального апарату і його енергетичних характеристик;
- визначення відхилення фактичної траєкторії польоту БПЛА від програмної і формування команд керування для корекції фактичної траєкторії БПЛА;
- відпрацювання командних значень параметрів положення і орієнтації БПЛА в просторі на всіх етапах польоту;
- забезпечення необхідної динамічної точності керування в широкому діапазоні змін параметрів літального апарату.

Процес вдосконалення наявних систем автопілотування спрямовано на внесення інтелектуальних функцій в роботу автопілоту, в тому числі на розроблення нових методів керування з метою розширення спектру розв'язуваних БПЛА завдань без прямої участі оператора.

Метою статті є створення нового методу інтелектуального керування БПЛА та його впровадження на прикладі розробленого інтегрально-адаптивного автопілоту БПЛА.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний розвиток інформаційних технологій дає змогу використовувати складні алгоритми керування навіть у відносно недорогих за вартістю автопілотах БпЛА. Сьогодні розроблено велику кількість автопілотів різного типу і призначення, які істотно різняться між собою як за вартістю, так і за структурою алгоритмів, що в них використовуються [4]. В ряді випадків поширені автопілоти позиціонують на ринку як універсальний засіб керування широкою номенклатурою БпЛА різного типу. Слід зазначити, що такі автопілоти в деяких випадках можуть бути недостатньо ефективними, бо вони не враховують в повному обсязі конструктивні особливості конкретного БпЛА, а також істотну нелінійність характеристик БпЛА під час глибокого маневрування.

Тому подальший розвиток алгоритмів автопілотів БпЛА проводять з метою забезпечення якісного польоту за умов суттєвої невизначеності, складних обмежень та наближенню функціонування автопілоту БпЛА до поведінки кваліфікованого оператора.

Традиційні автопілоти БпЛА основані на використанні пропорційно-інтегральних-диференціальних (ПІД) регуляторів. Перспективні автопілоти, в свою чергу, ґрунтуються на таких підходах, як адаптивні нейронні мережі, оптимізаційні методи, нечітка логіка тощо [5]. Для проведення аналізу сучасних автопілотів БпЛА та виявлення особливостей їх функціонування на різних режимах нижче розглянемо деякі з наявних підходів до керування БпЛА.

Підхід до керування БпЛА на основі ПІД-регуляторів. У роботі [6] для керування стабілізацією кутів орієнтації і висотою польоту БпЛА використовують пропорційно-інтегральний каскад (ПІ-каскад), застосований до кожної з осей обертання (крен, тангаж, ристання) (рис. 1, де α_{act} , α_{des} — поточний та бажаний кути орієнтації БпЛА; α_{err} — помилка кута орієнтації; Ω_{act} , Ω_{des} — поточна та бажана кутова швидкість обертання навколо осі; Ω_{err} — похибка кутової швидкості обертання навколо осі; Out — вихідний сигнал на органи керування БпЛА; П — пропорційна складова, І — інтегральна складова).

Автопілоти, побудовані на ПІД-регуляторах, мають ряд таких переваг:

- легкість конструювання регуляторів;
- проста структура алгоритмів керування і відносно нескладний розрахунок коефіцієнтів регулятора, що зумовлює знижені вимоги до обчислювальних ресурсів.

Водночас такі автопілоти мають недоліки:

- зміна характеристик об'єкту керування призводить до необхідності переналаштування параметрів ПІД-регулятора;
- поширені методи налаштувань регуляторів (наприклад, інтуїтивне налаштування, характеристичний та аналітичний методи) не можуть забезпечити високу якість керування через неможливість динамічної зміни параметрів регулятора;
- розрахунок і налаштування коефіцієнтів автопілоту потребують значного коригування на ранніх стадіях випробувань і експлуатації.

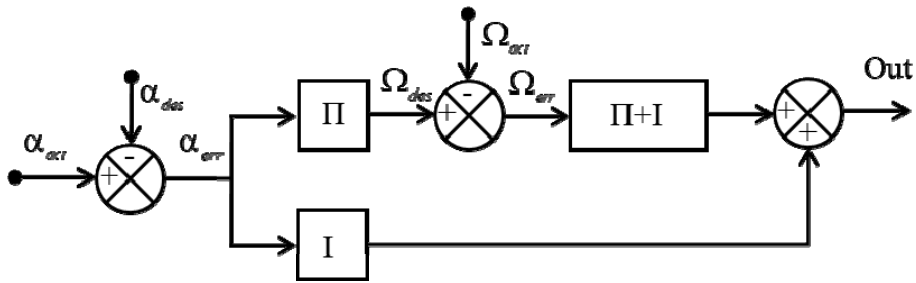


Рис. 1. Схема ПІ-каскаду керування стабілізацією кутів орієнтації

Так, результати комп'ютерного моделювання в роботі [6] показали, що автопілот, оснований на традиційних ПІД-регуляторах, не виключає наявності помилки керування від збурювального впливу і не дає змогу забезпечити необхідну динамічну точність керування кутом орієнтації у разі зміни режимів польоту і зовнішніх умов.

Отже, застосування в автопілотах БПЛА виключно ПІД-регуляторів обмежує надійність і точність таких систем керування. Тому є необхідним доповнення таких автопілотів складнішими стратегіями керування, які компенсують недоліки, притаманні ПІД-регуляторам.

Підхід до керування БПЛА на основі нейронних мереж. Автопілот БПЛА на основі адаптивного нейронно-мережевого контролера не вимагає точної математичної моделі, що є явною перевагою такого автопілота. Це дає змогу застосовувати ці підходи для керування польотом багатоцільових БПЛА [7]. Приклад такого автопілота для керування БПЛА запропоновано в роботі [8]. Синтез відповідного контролера виконано з поділом на внутрішній і зовнішній контури керування (рис. 2: x , p , δ , v , — вектори стану, положення, керування (відхилення керуючих поверхонь) та псевдокерування БПЛА відповідно; a , α — прискорення та кутове прискорення; q — кватерніон; ω — кутова швидкість. Нижні індекси: h — обмеження; c , des , ad — командний, бажаний та адаптивний сигнали; m — момент; f — сила). Внутрішній контур керує орієнтацією БПЛА за рахунок зміни моментів, які діють на БПЛА, у разі відхилення кермових поверхонь. Зовнішній контур керує силами, які діють на БПЛА, шляхом зміни величини тяги і орієнтації БПЛА.

Параметричну невизначеність, яка виникає в процесі керування БПЛА, мінімізують за допомоги адаптивного елементу. В якості адаптивного елементу в [8] використовують нейронну мережу — перцептрон з одним прихованим шаром, який є універсальним апроксиматором.

З недоліків, властивих системам такого типу, слід виокремити такі:

- складність структури алгоритмів;
- можливість виникнення небажаної адаптації до вхідних характеристик об'єкта керування;
- великий час навчання нейронної мережі для досягнення високої точності керування;
- зменшення точності керування за виникнення випадкових збурень.

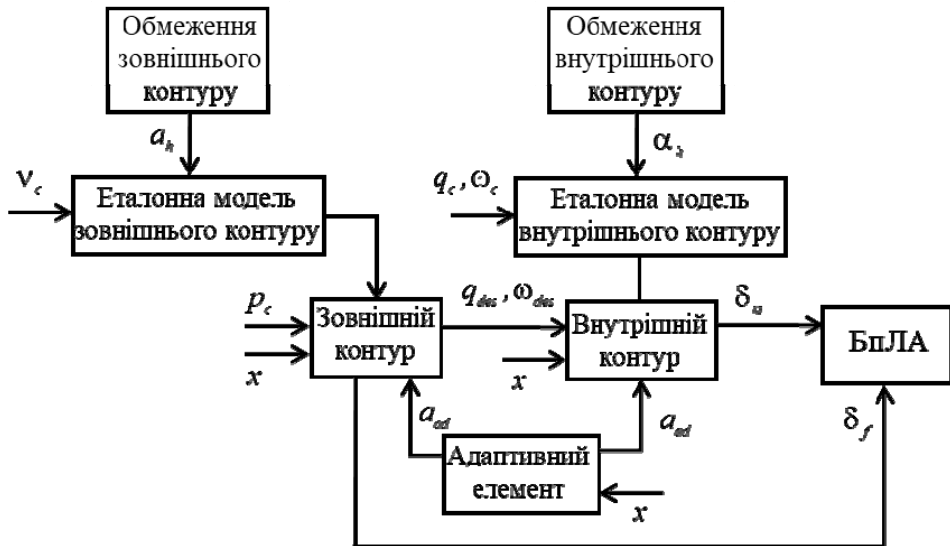


Рис. 2. Внутрішній і зовнішній контури автопілоту з адаптацією

Підхід до керування БПЛА на основі оптимізаційних методів. У роботах [9, 10] запропоновано архітектуру керування внутрішнім і зовнішнім контурами автопілоту БПЛА. Автопілот реалізують з використанням H_∞ -контролера (в рамках H_∞ -теорії формують задачі стеження, компенсації, оптимального наближення до заданих еталонів в частотній області, мінімаксні аналоги класичних лінійно-квадратичних задач). Автопілот складається з двох контурів (рис. 3). Завданням внутрішнього контуру є керування кутами тангажу, крену, ристання, а також тягою двигуна. Контролер внутрішнього контуру слугує для забезпечення робастності до параметричної невизначеності.

Два контролери входять до складу зовнішнього контуру, який відстежує характеристики еталонної моделі: контролер висоти і курсу. Обидва контролери використовують оптимізаційний метод.

З результатів моделювання, які наводять автори роботи [10], впливає, що застосування H_∞ -контролера не забезпечує керування БПЛА з необхідними показниками стійкості і якості.

Оптимізаційні методи мають такі переваги:

- зручність інженерної інтерпретації алгоритмів за їхньої відносної простоти;
- висока якість керування у випадках обмеженої невизначеності характеристик об'єкту керування;
- легкість використання методів для синтезу одномірних систем автоматичного керування.

Недоліки, властиві оптимізаційним методам:

- висувають високі вимоги до якості, повноти і точності еталонних математичних моделей об'єкта керування;
- оптимізація вимагає значних обчислювальних ресурсів і часу;
- застосування оптимізаційних методів у разі керування БПЛА з використанням спрощеної лінеаризованої моделі об'єкта керування викликає параметричну невизначеність.

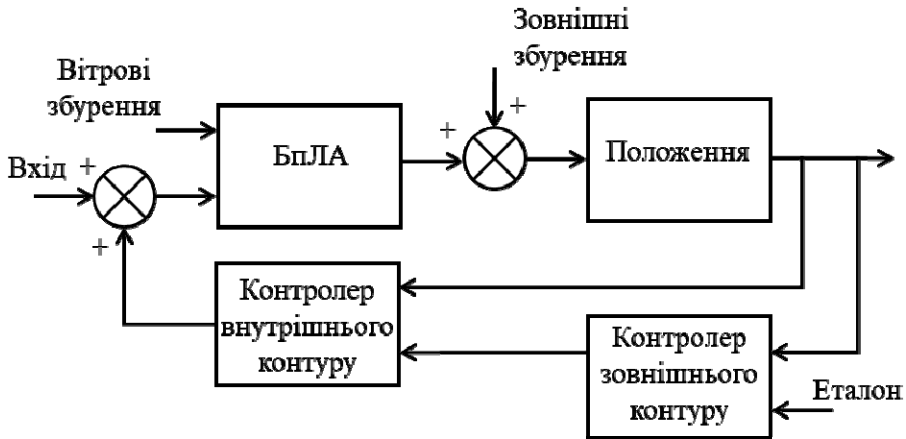


Рис. 3. Архітектура автопілоту БПЛА на основі оптимізаційного методу

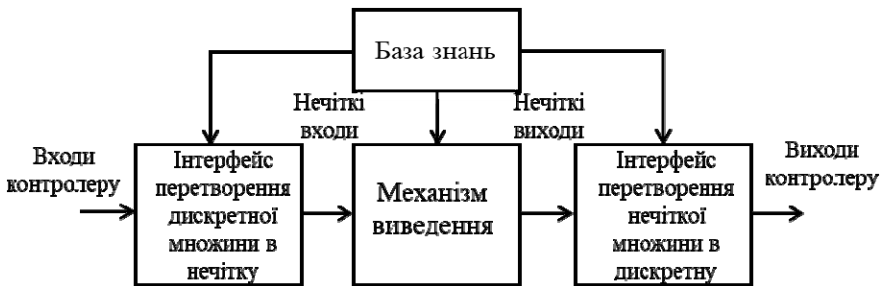


Рис. 4. Базова структура системи керування з нечіткою логікою

Підхід до керування БПЛА на основі методів нечіткої логіки. Системи керування з нечіткою логікою можуть використовуватися в багатьох галузях, включаючи керування польотом БПЛА. У значній кількості робіт йдеться про застосування в автопілотах контролерів на основі нечіткої логіки [5, 11]. Класична структура системи керування з нечіткою логікою складається з чотирьох основних компонентів: бази знань, інтерфейсу перетворення дискретної множини в нечітку, механізму виведення і інтерфейсу перетворення нечіткої множини в дискретну (рис. 4).

Приклад синтезу автопілоту БПЛА із застосуванням нечіткої логіки наведено в [12]. Цей автопілот складається з трьох контролерів на основі нечіткої логіки (один контролер використовують для керування бічним рухом БПЛА, два контролери — для керування поперечним рухом). Для підвищення точності керування в автопілот додано блок керування швидкістю і блок компенсації збурень, викликаних поривами вітру (рис. 5).

За результатами моделювання, наведеними в [12], видно, що за наявності збурень БПЛА не завжди виходить у задану точку маршруту, що призводить до викривлення траєкторії і появи зайвих маневрів. Також з'являються неточності в дотриманні заданої висоти польоту.

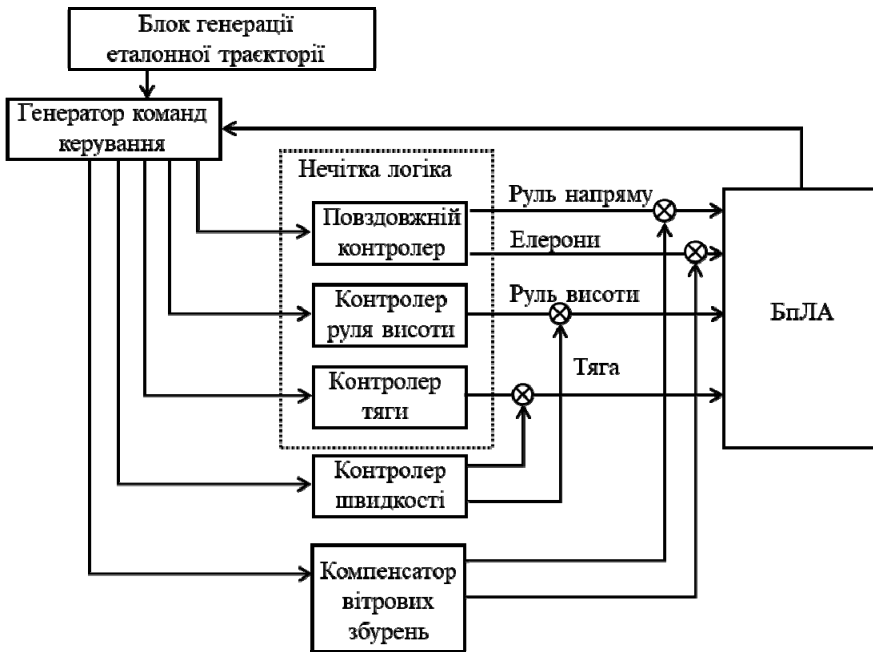


Рис. 5. Блок-схема системи автопілота із застосуванням нечіткої логіки

Переваги автопілотів, побудованих з використанням нечіткої логіки:

- значне скорочення обсягу обчислень;
- висока швидкодія;
- застосування нечіткого керування може бути найефективнішим в тих випадках, коли відсутня явна модель процесу або аналітична модель є занадто складною для подання або отримання розв'язку в реальному масштабі часу.

Загальними недоліками систем керування, основаних на методах нечіткої логіки, є:

- складність проектування таких систем;
- жорсткі вимоги до бази правил для реалізованої системи з використанням нечіткої логіки.

ВИОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНОЇ ЧАСТИНИ ПРОБЛЕМИ

Зі сказаного вище випливає, що автопілоти безпілотних літальних апаратів, побудовані на основі перерахованих підходів, можуть мати обмежені функціональні можливості під впливом комбінацій несприятливих чинників. Наприклад у ситуації, коли політ БПЛА протікає у збуреній атмосфері, а керування по всіх каналах автопілота здійснюють за одним принципом. Використання наявних методів керування без додаткових заходів щодо поліпшення якості їх роботи та внесення елементів інтелектуалізації не дає необхідної точності і автономності керування. Особливо це стосується ускладнень, які виникають під час виконання активних маневрів зі значними змінами висоти та швидкості польоту. Це відбувається з таких причин:

- високі динамічні властивості БпЛА;
- короткий час перехідних процесів, які протікають в системі керування БпЛА;
- велика кількість перехресних зв'язків між каналами керування.

Відповідно, можна зробити висновок про необхідність розроблення нового методу ефективного керування безпілотними літальними апаратами різного призначення в різноманітних і непередбачуваних умовах їх застосування. Для досягнення цієї мети необхідно удосконалення наявних і створення нових підходів, технологій і методів керування БпЛА, зокрема інтелектуальних. Водночас нові підходи і методи повинні мати здатність адаптації як до можливих змін у зовнішньому середовищі, так і до модифікації характеристик об'єкта керування.

Інтегрально-адаптивний автопілот безпілотного літального апарату. Магістральним напрямом розвитку інформаційних технологій є підвищення рівня їх інтелектуалізації, тобто створення інтелектуальних інформаційних систем.

Системи інтелектуального керування є особливим класом інтелектуальних інформаційних систем. Розроблення в цій галузі спрямовано на створення концепцій, технологій, методів і моделей для високоточного керування динамічними об'єктами в динамічному середовищі (інакше кажучи, складними і мінливими об'єктами в складному і мінливому середовищі) за умов збереження необхідних показників якості, швидкодії і стійкості керування.

Основні особливості систем інтелектуального керування [13, 14]:

- термін «керування» за інтелектуального керування має загальніше значення, ніж за традиційного керування, тобто включає процеси діагностики ситуації, планування дій, прийняття рішень тощо;
- здатність до автономного формулювання своїх цілей і автономних дій;
- можливість ефективних дій за умов невизначеності та складних обмежень;
- наявність істотно нелінійних об'єктів керування;
- здатність швидкої та якісної адаптації до змін, по-перше, зовнішніх умов, по-друге, характеристик об'єкта керування і, по-третє, параметрів і/або структури самої інтелектуальної системи.

Для усунення недоліків вищеперерахованих підходів, які використовують в автопілотах БпЛА, запропоновано новий метод інтелектуалізації БпЛА та застосування розроблених на його основі алгоритмів для створення інтегрально-адаптивного автопілоту. Створений автопілот дає змогу:

- забезпечити генерацію інтегрально-адаптивних команд керування по всіх каналах та досягти підвищення якості і стійкості керування;
- реалізовувати складні просторові траєкторії польоту з великими змінами висоти та швидкості, а також за наявності істотно криволінійних ділянок глибокого маневрування у вертикальній і горизонтальній площинах;
- компенсувати перехресні зв'язки та взаємний вплив поміж каналами керування;
- діяти за умов обмеження доступу інформації та невизначеності;
- досягти підвищення точності керування БпЛА у разі зовнішніх збурень.

Під час розроблення інтегрально-адаптивного автопілоту в якості одного з методів підвищення інтелектуалізації традиційного керування БпЛА на основі ПД-регуляторів використано метод віртуального керування [15].

Віртуальне керування включає етапи постановки та розв'язання завдання синтезу віртуального об'єкта керування, еквівалентного реальному нелінійному об'єкта (в нашому випадку — БпЛА). Для такого нелінійного об'єкта синтез законів керування аналітичним методом має значні труднощі. Віртуальне керування дає змогу досліджувати об'єкт керування комплексно, без спрощень і лінеаризації системи рівнянь, які його описують [16].

Віртуальне керування передбачає розв'язання завдання в два етапи.

Перший етап — на основі початкового реального об'єкта синтезувати віртуальний об'єкт з інваріантною та автономною організацією керування, його віртуальну область станів і віртуальну область керування.

Другий етап — за віртуальним об'єктом і віртуальним керуванням синтезувати реальне керування реальним об'єктом.

Віртуальне керування дає змогу синтезувати віртуальний об'єкт і знайти області можливого керування віртуальним об'єктом, що, в свою чергу, надає можливість розв'язати завдання синтезу керування реальним об'єктом на основі віртуального керування. Система диференційних рівнянь, яка описує віртуальний об'єкт, має в порівнянні з початковою системою рівнянь, які описують реальний об'єкт, надлишкові розв'язки, а розв'язок кінцевої системи рівнянь одночасно є розв'язком і початкової системи. Тому забезпечення умов інваріантності і автономності для всієї сукупності розв'язків кінцевої системи автоматично забезпечить інваріантність і автономність для розв'язків початкової системи рівнянь. Отже, застосування віртуального керування дає змогу розглядати повні нелінійні моделі об'єктів для подальшого розроблення принципово нових нелінійних регуляторів, які забезпечать стійкість об'єктів керування, а також інваріантність до зовнішніх збурень.

Розглянемо детальніше принцип роботи розробленого *інтегрально-адаптивного автопілоту керування просторовим маневруванням БпЛА* (рис. 6).

Для реалізації керування БпЛА в класі віртуальних стратегій було вибрано структуру інтегрально-адаптивного автопілоту, яка містить: генератор заданих параметрів керування, модуль формування похибки за креном, модуль формування похибки за тангажем, сенсорний модуль, модуль обчислення координованого розвороту, модуль формування динаміки віртуального керування креном, модуль формування динаміки віртуального керування тангажем, модуль формування динаміки віртуального керування тангажем, модуль зберігання та апроксимації аеродинамічних даних, лінійний обчислювальний модуль та нелінійний обчислювальний модуль (рис. 6).

Рух БпЛА розглядають у зв'язаній системі координат $OXYZ$, початок координат якої розташовано в центрі мас БпЛА, вісь OX лежить в площині симетрії і спрямована до носової частини БпЛА, вісь OY лежить в площині симетрії БпЛА і спрямована вгору (у разі горизонтального польоту), а вісь OZ доповнює систему до правої системи координат.

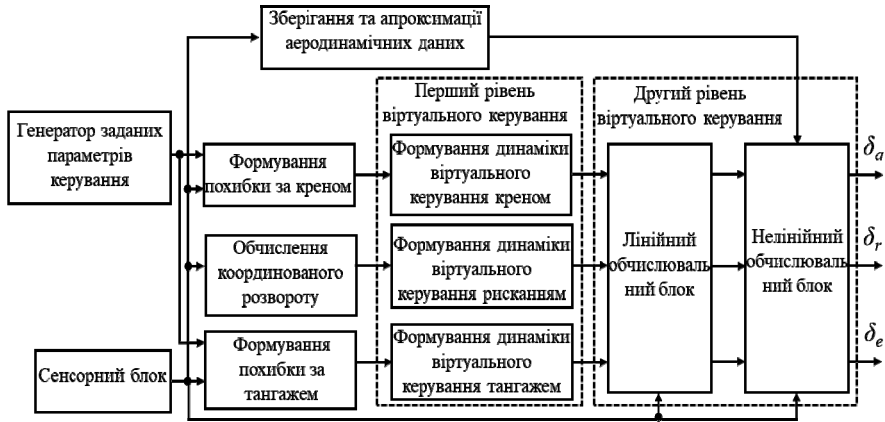


Рис. 6. Структурна схема інтегрально-адаптивного автопілоту БпЛА

Генератор заданих параметрів керування циклічно генерує часову послідовність командних сигналів крену γ_{cmd} та тангажу ϑ_{cmd} для забезпечення цільового просторового маневрування у горизонтальній та вертикальній площинах відповідно.

Сенсорний модуль формує сигнали поточного стану БпЛА. Ці сигнали надходять від набору датчиків, які виробляють сигнали кута крену γ , ристання ψ і тангажу ϑ , температури повітря T , барометричного тиску B , повітряної швидкості V , перевантажень n_x, n_y, n_z , а також кутових швидкостей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$.

Похибки за креном та за тангажем визначають за рівняннями:

$$\Delta\gamma = \gamma_{cmd} - \gamma;$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{cmd} - \vartheta.$$

Модуль обчислення координатного розвороту генерує сигнали помилки кутової швидкості координатного розвороту $\Delta\omega_y$ та бокового перевантаження Δn_z :

$$\Delta\omega_y = K_{RY} \frac{g}{V} \sin\gamma - \omega_y;$$

$$\Delta n_z = K_n n_z,$$

де g — прискорення вільного падіння; n_z — поточне значення бічного перевантаження; K_{RY}, K_n — передавальні числа координатного розвороту та бічного перевантаження відповідно.

Модулі формування динаміки віртуального керування креном, ристанням та тангажем сукупно складають перший рівень віртуального керування просторовим маневруванням БпЛА. Ці модулі задають подання багатовимірної системи керування у вигляді сукупності незалежних одновимірних автономних систем керування:

$$\begin{aligned} \ddot{\gamma} &= p_{\gamma}; \\ \ddot{\psi} &= p_{\psi}; \\ \ddot{\vartheta} &= p_{\vartheta}, \end{aligned} \tag{1}$$

де p_{γ} , p_{ψ} , p_{ϑ} — командні сигнали віртуального керування креном, рисканням та тангажем.

Для системи рівнянь (1) можуть застосовуватися всі методи проектування, розроблені для одновимірних систем. Наприклад, методи побудови пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів, методи побудови оптимальних за швидкістю регуляторів та інші. За допомоги доповнення алгоритмів керування з використанням ПД-регуляторів віртуальним керуванням вдається досягти вищої якості керування. Командні сигнали віртуального керування креном p_{γ} , рисканням p_{ψ} та тангажем p_{ϑ} розраховують за формулами:

$$\begin{aligned} p_{\gamma} &= (K_{\gamma} + \frac{1}{pTi_{\gamma}} + pTd_{\gamma})\Delta\gamma; \\ p_{\vartheta} &= (K_{\vartheta} + \frac{1}{pTi_{\vartheta}} + pTd_{\vartheta})\Delta\vartheta; \\ p_{\psi} &= (K_{\omega_y} + \frac{1}{pTi_{\omega_y}} pTi_{\omega_y} + pTd_{\omega_y})\Delta\omega_y + \\ &+ (K_{n_z} + \frac{1}{pTi_{n_z}} pTi_{n_z} + pTdn_z)\Delta n_z, \end{aligned}$$

де $p = \frac{d}{dt}$ — оператор диференціювання за часом; K_{γ} , Td_{γ} , Ti_{γ} — передавальні числа відповідно пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі крену; K_{ϑ} , Td_{ϑ} , Ti_{ϑ} — передавальні числа відповідно пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі тангажу; K_{ω_y} , Td_{ω_y} , Ti_{ω_y} — передавальні числа відповідно пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі рискання та помилки кутової швидкості координованого розвороту $\Delta\omega_y$; K_{n_z} , Tdn_z , Ti_{n_z} — передавальні числа відповідно пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі рискання та помилки бокового перевантаження Δn_z .

Кінематичні рівняння, які пов'язують похідні кутів $\dot{\psi}$, $\dot{\vartheta}$, $\dot{\gamma}$ з кутовими швидкостями обертання ω_x , ω_y , ω_z БПЛА мають вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= \frac{(\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma)}{\cos \vartheta}; \\ \dot{\vartheta} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma; \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) \frac{\sin \vartheta}{\cos \vartheta}.\end{aligned}\tag{2}$$

Система рівнянь першого рівня віртуального керування для просторового маневрування БПЛА (1) та система кінематичних рівнянь (2) надає можливість сформувати систему з трьох лінійних рівнянь з трьома невідомими командними сигналами віртуального керування другого рівня $\dot{\omega}_{xC}$, $\dot{\omega}_{yC}$, $\dot{\omega}_{zC}$:

$$\begin{aligned}k_{1x}\dot{\omega}_{xC} + k_{1y}\dot{\omega}_{yC} + k_{1z}\dot{\omega}_{zC} &= K_1, \\ k_{2x}\dot{\omega}_{xC} + k_{2y}\dot{\omega}_{yC} + k_{2z}\dot{\omega}_{zC} &= K_2, \\ k_{3x}\dot{\omega}_{xC} + k_{3y}\dot{\omega}_{yC} + k_{3z}\dot{\omega}_{zC} &= K_3.\end{aligned}\tag{3}$$

Коефіцієнти $k_{1x}, k_{1y}, k_{1z}, k_{2x}, k_{2y}, k_{2z}, k_{3x}, k_{3y}, k_{3z}, K_1, K_2, K_3$ у системі рівнянь (3) обчислюють за допомоги диференціювання співвідношень в (2) і мають такі значення:

$$\begin{aligned}k_{1x} &= 0, k_{1y} = \frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta}, k_{1z} = \frac{-\sin \gamma}{\cos \vartheta}; \\ k_{3x} &= 1, k_{3z} = \frac{\sin \gamma \sin \vartheta}{\cos \vartheta}; \\ k_{2x} &= 0, k_{2y} = \sin \gamma, k_{2z} = \cos \gamma; \\ K_1 &= p_\psi + \omega_y \left[\left(\frac{\sin \gamma}{\cos \vartheta} \right) - \left(\frac{\cos \gamma \sin \vartheta}{\cos^2 \vartheta} \right) \right] + \\ &+ \omega_z \left[\left(\frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta} \right) - \left(\frac{\sin \gamma \sin \vartheta}{\cos^2 \vartheta} \right) \right]; \\ K_2 &= p_\vartheta - \omega_y \cos \gamma + \omega_z \sin \gamma; \\ K_3 &= p_\gamma - \omega_y \left[\left(\frac{\cos \gamma}{\cos^2 \vartheta} \right) - \left(\frac{\sin \gamma \sin \vartheta}{\cos \vartheta} \right) \right] - \\ &- \omega_z \left[\left(\frac{\cos \gamma \sin \vartheta}{\cos \vartheta} \right) + \left(\frac{\sin \gamma}{\cos^2 \vartheta} \right) \right].\end{aligned}\tag{4}$$

Після розв'язку рівнянь (3) з урахуванням рівнянь (4) та використовуючи сигнали поточного стану БПЛА, формують командні сигнали віртуального керування другого рівня у лінійному обчислювальному модулі:

$$\begin{aligned}w_x &= \dot{\omega}_{xC}; \\w_y &= \dot{\omega}_{yC}; \\w_z &= \dot{\omega}_{zC}.\end{aligned}\tag{5}$$

Ці сигнали призначено для формування у подальшому реальних команд керування кутами відхилення елеронів, руля висоти та руля напрямку.

У нелінійному обчислювальному модулі розв'язується система рівнянь руху БпЛА, записана відносно центру мас у зв'язаній системі координат. Можливі варіанти подання системи нелінійних диференціальних рівнянь, що характеризують параметри руху БпЛА, наведено в джерелах [17, 18]. Для розв'язання системи рівнянь нелінійний обчислювальний модуль може використовувати будь-який з відомих методів обчислення системи нелінійних рівнянь, наприклад, методи Ньютона-Рафсона, Зейделя, Бroyдена тощо. Чим точніше застосовані рівняння описують реальні параметри руху БпЛА, тим ефективнішим буде процес інтегральної адаптації автопілоту до реальних умов маневрування.

Потрібні для розрахунків коефіцієнти аеродинамічних сил і моментів знаходяться у модулі зберігання та апроксимації аеродинамічних даних у вигляді таблиць даних. Ці дані отримують на основі аеродинамічних досліджень відповідної моделі БпЛА.

За сигналами віртуального керування другого рівня w_x , w_y , w_z нелінійний обчислювальний модуль формує реальні команди керування кутами відхилення елеронів δ_e , руля висоти δ_δ та руля напрямку δ_n . В подальшому ці сигнали надходять на виконавчі механізми аеродинамічних поверхонь керування БпЛА.

Розроблений інтегрально-адаптивний автопілот має такі переваги:

- збільшено кількість та підвищено ефективність альтернативних варіантів планування руху БпЛА;
- покращено точність та підвищено надійність відпрацювання складних просторових траєкторій польоту;
- надано можливість адаптуватися до суттєвих змін висоти та швидкості польоту безпілотного літального апарату;
- надано можливість виконувати маневрування у вертикальній і горизонтальній площинах з істотно криволінійними ділянками;
- відпрацьовано перехресні зв'язки та компенсовано взаємний вплив між каналами керування БпЛА;
- забезпечено автономність роботи за умов невизначеності та складних обмежень.

ВИСНОВКИ

Незважаючи на значну кількість теоретичних робіт та активний розвиток інформаційних технологій, проблема ефективного керування безпілотним літальним апаратом є надзвичайно актуальною. В роботі показано недостатню ефективність функціонування традиційних автопілотів безпілотних літальних апаратів за наявності зовнішніх збурень, невизначеності та у разі глибокого маневрування.

Ефективне керування безпілотним літальним апаратом за різних і непередбачуваних умов, які досить швидко змінюються, вимагає нових підходів до синтезу систем автопілотування. Одним із сучасних інструментів вирішення цього питання є застосування інтелектуальних систем керування у складі перспективних безпілотних літальних апаратів.

Використання запропонованого підходу уможливорює створення інтегрально-адаптивного автопілота для реалізації складного просторового маневрування безпілотного літального апарату. Цим забезпечено можливість застосування повних нелінійних моделей безпілотних літальних апаратів без спрощень та лінеаризації. Крім того, є можливим використання розширеного діапазону параметрів та альтернативних варіантів структурної організації бортових систем. Підвищення точності та сталості керування забезпечено за рахунок штучного перетворення процесів, що протікають у багатовимірній системі, в сукупність віртуальних автономних процесів, для кожного з яких досить легко синтезують алгоритм керування автономною підсистемою. Насамкінець здійснюють процедуру координації дій всіх автономних підсистем в єдиний функціональний комплекс.

На відміну від наявних систем, запропонований інтегрально-адаптивний автопілот дає можливість доповнити лінійні рівняння руху повними нелінійними аеродинамічними моделями безпілотного літального апарату. Внаслідок цього підвищено якість керування за критичних умов та нештатних ситуацій, наприклад, за умов непередбаченого виходу ряду суттєвих параметрів за допустимі межі. В розробленому автопілоті здійснюється формування команд дворівневого віртуального керування, які дають змогу ефективно адаптуватися до змін висоти та швидкості польоту безпілотного літального апарату.

Поєднання в інтегрально-адаптивному автопілоті традиційних підходів керування безпілотними літальними апаратами із запропонованим методом віртуального керування уможливорює підвищення рівня інтелектуалізації безпілотного літального апарата та забезпечує якісне виконання завдань, які постають перед безпілотною авіацією.

ЛІТЕРАТУРА

1. Fahlstrom P., Gleason T. Introduction to UAV systems. Hoboken: Wiley, 2012. 4th ed. 308 p.
2. Моисеев В.С. Прикладная моногр управления беспилотными летательными. Монографія. Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. 768 с.
3. Beard R.W., McLain T.W. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. Princeton: Princeton Univ. Press, 2012. 320 p.
4. Chao H., Cao Y., and Chen Y.Q. Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey. *International Journal of Control, Automation, and Systems*. 2010. vol. 8, no. 1. P. 36–44.

5. Feng G.A. Survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2006. vol. 14, no. 5. P. 676–697.
6. Шилов К.Е. Разработка системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом мультироторного типа. *Труды МФТИ*. 2014. № 4. С. 139–152.
7. Calise A., Rysdyk R. Nonlinear Adaptive Flight Control Using Neural Networks. *Control Systems Magazine*. 1998. vol. 18, no. 6. P. 14–25.
8. Johnson E.N., Kannan S.K. Adaptive Flight Control for an Autonomous Unmanned Helicopter. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Monterey, California, August, 2002.
9. Lopez J., Dormido R., Gomez J.P., Dormido S., Diaz J.M. Comparison of H-infinity with QFT applied to an Altitude Command Tracker for an UAV. Proc. of the European Control Conference (2 – 5th of July, 2007, Kos, Greece) Kos, Greece, 2007. P. 46–54.
10. Lopez J., Dormido R., Dormido S., Gomez J.P. A Robust Controller for an UAV Flight Control System. *The Scientific World Journal*. 2015. vol. 2015. P. 15–26.
11. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications, 2nd Edition. New York, NY: Wiley, 2004. 228 p.
12. Kumon M., Udo Y., Michihira H., Nagata M., Mizumoto I., Iwai Z. Autopilot system for kiteplane. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2006. vol. 11, no. 5. P. 615–624.
13. Albus J.S. On intelligence and its dimensions. *Technical report of the ISIS (Interdisciplinary studies of intelligent systems) group* №. ISIS 94-001. University of Notre Dame, 1994. P. 11–13. URL: <http://www.nd.edu/~pantsakl/Publications/150-ISIS94.pdf>. (Дата звернення: 10.11.2018.).
14. Antsaklis P.J. On autonomy and intelligence in control. *Technical report of the ISIS (Interdisciplinary studies of intelligent systems) group* №. ISIS 94-001. University of Notre Dame, 1994. P. 14–18. URL: <http://www.nd.edu/~pantsakl/Publications/150-ISIS94.pdf>. (Дата звернення: 10.11.2018.).
15. Гриценко В.І., Волков О.Є., М.М. Комар, Богачук Ю.П. Інтелектуалізація сучасних систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами. *Кибернетика и вычисл. техника*. 2018. № 1 (191). С. 45–59.
16. Павлов В.В., Павлова С.В. Интеллектуальное управление сложными нелинейными динамическими системами. Киев: Наукова думка, 2015. 216 с.
17. Харченко В.П., Чепіженко В.І., Тунік А.А., Павлова С.В. Авіоніка безпілотних літальних апаратів. Київ: ТОВ «Абрис-принт», 2012. 464 с.
18. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. Москва: Машиностроение, 1973. 501 с.

Отримано 19.11.2018

REFERENCES

1. Fahlstrom P., Gleason T. *Introduction to UAV systems*. Hoboken: Wiley, 2012. 4th ed. 308 p.
2. Moiseyev V.S. *Applied theory of unmanned aerial vehicles control*. Kazan: GBU Republican centre for monitoring education quality, 2013. p. 768. (in Russian).
3. Beard R.W., McLain T.W. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton: Princeton Univ. Press, 2012. 320 p.
4. Chao H., Cao Y., and Chen Y.Q. Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2010, vol. 8, № 1. P. 36–44.
5. Feng G. A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2006, vol. 14, № 5. P. 676 – 697.
6. Shilov K.Ye. Development of unmanned air vehicle automatic control system of a rotorcraft. *Works of MFTI*, 2014. № 4. P. 139–152. (in Russian).
7. Calise A., Rysdyk R. Nonlinear Adaptive Flight Control Using Neural Networks. *Control Systems Magazine*, 1998, vol. 18, №. 6. P. 14–25.
8. Johnson E.N., Kannan S.K. Adaptive Flight Control for an Autonomous Unmanned Helicopter. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Monterey, California, August, 2002.
9. Lopez J., Dormido R., Gomez J.P., Dormido S., Diaz J.M. Comparison of H-infinity with QFT applied to an Altitude Command Tracker for an UAV. Proc. of the European Control Conference (2 – 5th of July, 2007, Kos, Greece) Kos, Greece, 2007. P. 46–54.

10. Lopez J., Dormido R., Dormido S., Gomez J.P. A Robust Controller for an UAV Flight Control System. *The Scientific World Journal*. 2015. vol. 2015. P. 15–26.
11. Ross T.J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications, 2nd Edition*. New York, NY: Wiley, 2004. 228 p.
12. Kumon M., Udo Y., Michihira H., Nagata M., Mizumoto I., Iwai Z. Autopilot system for kiteplane. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2006. vol. 11. № 5. P. 615–624.
13. Albus J.S. On intelligence and its dimensions. *Technical report of the ISIS (Interdisciplinary studies of intelligent systems) group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame, 1994. P. 11–13.
14. Antsaklis P.J. On autonomy and intelligence in control. *Technical report of the ISIS (Interdisciplinary studies of intelligent systems) group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame, 1994. P. 14–18.
15. Grytsenko V.I., Volkov O.E., Komar M.M., Bogachuk Yu.P. Intellectualization of the modern automatic control systems for unmanned aerial vehicles. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2018. № 1 (191). P. 45–59. (in Ukrainian)
16. Pavlov V.V., Pavlova S.V. *Intellectual control of complex non-linear dynamic systems*. Kiev: Naukova dumka. 2015. 216 p. (in Russian).
17. Kharchenko V.P., Chepizhenko V.I., Tounik A.A., Pavlova S.V. *Unmanned aerial vehicles avionics*. Kiev: TOV Abris-print, 2012. 464 p. (in Ukrainian).
18. Bodner V.A. *Air vehicle control systems*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973. 501 p. (in Russian).

Received 19.11.2018

Гриценко В.И., член-корреспондент НАН Украины,
директор Международного научно-учебного центра
информационных технологий и систем
НАН Украины и МОН Украины
e-mail: vig@irtc.org.ua

Волков А.Е., и.о. зав. отделом,
отд. интеллектуального управления,
e-mail: alexvolk@ukr.net

Комар Н.Н., науч. сотр.,
отд. интеллектуального управления,
e-mail: nickkomar08@gmail.com

Шенетуха Ю.М., канд. техн. наук,
вед. науч. сотр., отд. интеллектуального управления,
e-mail: dep185@irtc.org

Волошенко Д.А., науч. сотр.,
отд. интеллектуального управления,
e-mail: dep185@irtc.org

Международный научно-учебный центр
информационных технологий и систем
НАН Украины и МОН Украины,
пр. Акад. Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина

ИНТЕГРАЛЬНО-АДАПТИВНЫЙ АВТОПИЛОТ КАК СРЕДСТВО ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В работе исследованы алгоритмы управления, которые используются в автопилотах современных беспилотных летательных аппаратов, а также рассмотрен вопрос создания и применения новых интеллектуальных методов и систем автоматического пилотирования беспилотных летательных аппаратов. Предложен интегрально-адаптивный автопилот для реализации сложного пространственного маневрирования беспилотного летательного

апарата. Описан подход к решению задачи управления беспилотным летательным аппаратом в классе виртуальных стратегий с использованием виртуального управления, что дает возможность исследовать объект управления комплексно без упрощений и линеаризации системы уравнений, которые его описывают. Использование метода, предложенного в статье, позволяет создавать адаптивные автопилоты для выполнения сложных пространственных маневрирования беспилотного летательного аппарата, динамика движения которого описывается полными нелинейными системами уравнений.

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, система управления, виртуальное управление, адаптация, инвариантность.*

Gritsenko V.I., Corresponding Member of NAS of Ukraine,
Director of International Research and Training
Center for Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine
e-mail: vig@irtc.org.ua

Volkov O.Ye., Acting Head of Department,
Intelligent Control Department,
e-mail: alexvolk@ukr.net

Komar M.M., Researcher,
Intelligent Control Department,
e-mail: nickkomar08@gmail.com

Shepetukha Yu.M., PhD (Engineering)
Leading Researcher,
Intelligent Control Department,
e-mail: dep185@irtc.org

Voloshenyuk D.O., Researcher,
Intelligent Control Department,
e-mail: dep185@irtc.org
International Research and Training Center
for Information Technologies and Systems
of National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
40, Glushkova ave., Kyiv, 03187, Ukraine.

INTEGRAL-ADAPTIVE AUTOPILOT
AS A MEANS OF INTELLECTUALIZING
A MODERN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Introduction. At present unmanned aerial vehicles (UAVs) are successfully used in various industries in performing scientific and engineering, economical, military and a number of other missions. Effectiveness of their functioning is mainly determined by an onboard suit of hardware and software of a UAV's control system. The process of the existing autopilot systems enhancement is intended to broaden the range of UAV's tasks without direct human involvement and introduce additional smart functions into autopilot operation.

Purpose. The aim of research is to study the modern algorithms used in autopilots of unmanned aerial vehicles and formulation of the problem of development and usage of new intellectual methods for automatic control systems.

Results. The approach considered in the article is based on the theory of high-precision remote control of dynamic objects and on the complex interaction of methods of theory of invariance, adaptive control and intellectualization of processes of UAV control.

One of the features of the proposed method of intellectual control for unmanned aerial vehicle autopilot is the procedure of transforming a multi-dimensional system into an

aggregate of virtual autonomous processes, for each of which the control algorithm is easily generated by an autonomous subsystem. Coming up next is the procedure of coordination of actions of all the autonomous systems into single functioning complex. This provides an opportunity to improved precision and sustainability of control.

Conclusion. Using the method described in the article allows creating integral and adaptive autopilots to perform complicated spatial maneuvering an unmanned aerial vehicle being based on usage of full non-linear models without simplifications and linearization.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, control system, virtual control, adaptation invariance.*