

УДК 629.7.004

канд. техн. наук, доц. Данилюк І. А. ORCID: 0000-0003-0955-0108 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

Куцаєв В. В. ORCID: 0000-0001-8213-4739 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

Семитківська І. В. ORCID: 0009-0000-9962-5032 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

Зінченко Н. Р. ORCID: 0009-0004-1837-2838 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

Міроненко О. В. ORCID: 0000-0002-3763-5478 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЙ ОПЕРАТОРА БЕЗПІЛОТНОЇ ПЛАТФОРМИ

У статті розглянуто актуальні питання ефективності функціонування Сил Безпілотних Систем у контексті активного розвитку та масштабування процесів створення, логістики й бойового застосування безпілотних і роботизованих комплексів різного призначення (повітряних, наземних, надводних, підводних тощо). Представлено результати дослідження моделі «ручного управління» дроном, у межах якої центральною ланкою контуру управління виступає людина-оператор. Наукова мета роботи полягає у вивченні можливостей, вимог та функціональних характеристик оператора дрону, що забезпечує «вищий» рівень управління, у той час як апаратно-програмний комплекс виконує роль «нижчого» технічного рівня.

Проведені експерименти підтвердили високу ефективність управління дроном підготовленим бойовим оператором, який здатен самостійно орієнтуватися без використання GPS, розпізнавати цілі, приймати рішення в реальному часі та підтримувати усвідомлений інформаційний обмін. Особливо наголошено на здатності оператора до навчання, донавчання й самонавчання, що є ключовим чинником зростання ефективності під час виконання бойових завдань.

Разом із виявленими перевагами відзначено і певні обмеження – зокрема, швидкість обробки інформації, реакції та прийняття рішень оператором, а також залежність результативності від його психологічно-емоційного стану.

Перспективним напрямом подальших досліджень визначено створення та аналіз автоматизованих і автоматичних моделей управління безпілотними роботизованими комплексами з використанням методів машинного зору, штучного інтелекту та технологій адаптивної взаємодії людини з технічними системами.

Ключові слова: дрон, оператор, апаратно-програмний комплекс, ручне управління, автоматизована модель управління, штучний інтелект, бойова ефективність.

I. Danyliuk, V. Kutsaiev, I. Semytkivska, N. Zinchenko, O. Mironenko. Research on the effectiveness of the operator's actions

The article examines the current effectiveness of the Unmanned Systems Forces in the context of the rapid development and large-scale deployment of unmanned and robotic complexes of various types (aerial, ground, and others). The research focuses on the manual drone control model, where the human operator acts as the central element of the control loop. The scientific objective of this study is to explore the operator's capabilities, functional requirements, and cognitive workload in performing higher-level control functions, while the hardware–software complex (HSC) provides lower-level technical control.

Experimental results demonstrate the high efficiency of drone control performed by a well-trained operator capable of independently orienting without GPS, identifying and selecting targets, evaluating mission status, generating control commands, and maintaining situational awareness through conscious information exchange. A key factor contributing to mission success is the operator's ability to learn, relearn, and self-learn, which enhances operational performance and adaptability in combat conditions.

At the same time, several constraints have been identified, including limited information-processing speed, reaction time, and decision-making rate, as well as the influence of the operator's psychological and emotional state on combat effectiveness.

Future research will focus on developing and analyzing automated and fully automatic control models for robotic systems, integrating machine vision, artificial intelligence, and adaptive human–machine interaction technologies to improve mission reliability and efficiency.

Keywords: drone, operator, hardware–software complex, manual control, automated control model, artificial intelligence, combat effectiveness.

Постановка проблеми

У сучасних умовах стрімкого розвитку робототехніки, штучного інтелекту та автономних систем центральна наукова проблема, сформульована авторами, набуває особливої актуальності, а саме забезпечення оптимальної, стійкої та адаптивної ефективності

управління автоматизованими роботизованими комплексами, в тому числі безпілотними платформами, за рахунок інтеграції когнітивних переваг людини-оператора з обчислювальними та аналітичними можливостями інтелектуальних систем управління. Наукова новизна полягає у пошуку динамічної рівноваги між рівнем автономності системи та ступенем людського контролю, що передбачає розроблення моделей гібридної людино-машинної взаємодії, оптимізацію інтерфейсів ситуаційного сприйняття та формування архітектури адаптивного керування, здатної реагувати на змінні умови середовища у реальному часі. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку інтелектуальних бойових систем, когнітивної автоматизації та концепції “human-in-the-loop AI”, що поєднує автономність із надійністю та етичним контролем людини.

Для комплексного розуміння цього процесу авторами запропоновано розглядати повний життєвий цикл створення та бойового застосування безпілотних платформ (БП) як послідовність етапів, що показані на діаграмі рисунка 1.

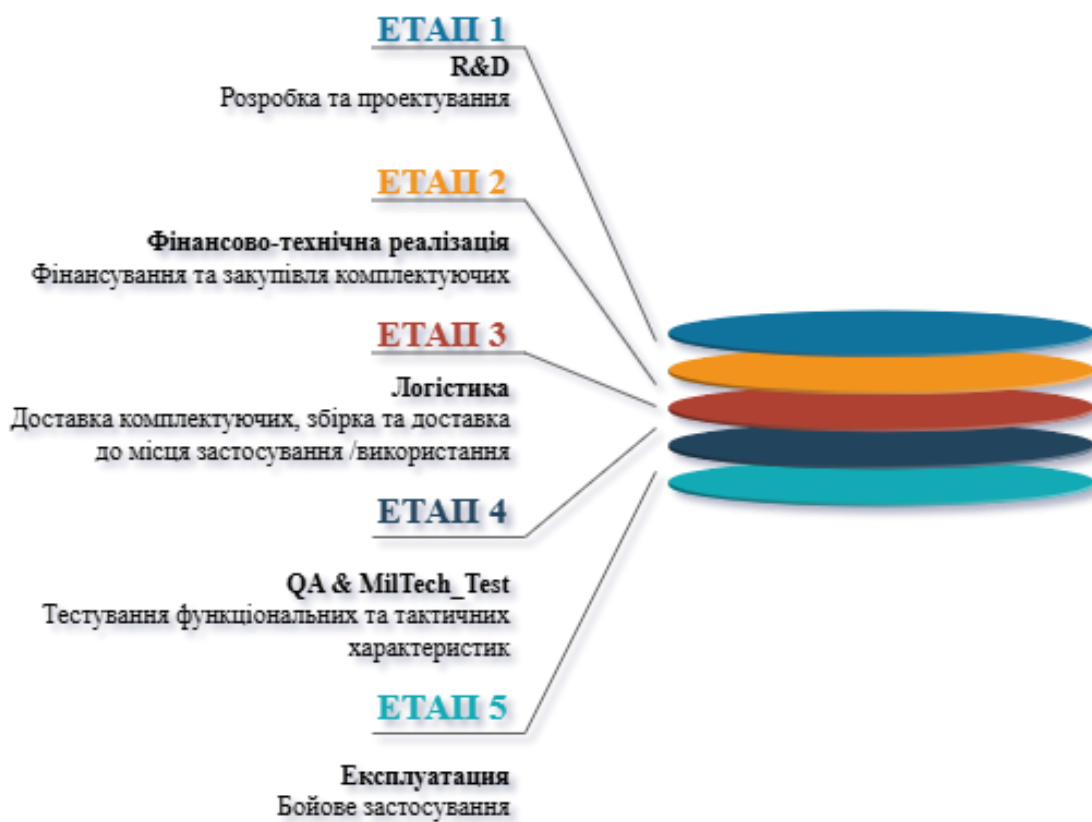


Рис. 1. Діаграма етапів процесу повного життєвого циклу

Як ключовий етап дослідження автори розглядають саме п'ятий етап життєвого циклу – експлуатацію/застосування моделей управління БП. У сучасних умовах Сили Оборони України використовують комбіновану схему керування, що поєднує три взаємодоповнювальні моделі: ручну; автоматизовану; автоматичну. При цьому ручна модель розглядається авторами як базова, оскільки саме вона є відправною точкою для побудови гібридних систем прийняття рішень і управління у реальних бойових сценаріях.

На рисунку 2 подано спрощений контур управління, у центрі якого розташовано людину-оператора БП (ОБП), що виконує функції управління “вищого рівня”. У цій моделі оператор формує стратегічні та тактичні рішення, визначає пріоритети місії, координує взаємодію з апаратно-програмним комплексом (АПК), який реалізує технічне управління на “нижчому рівні”.

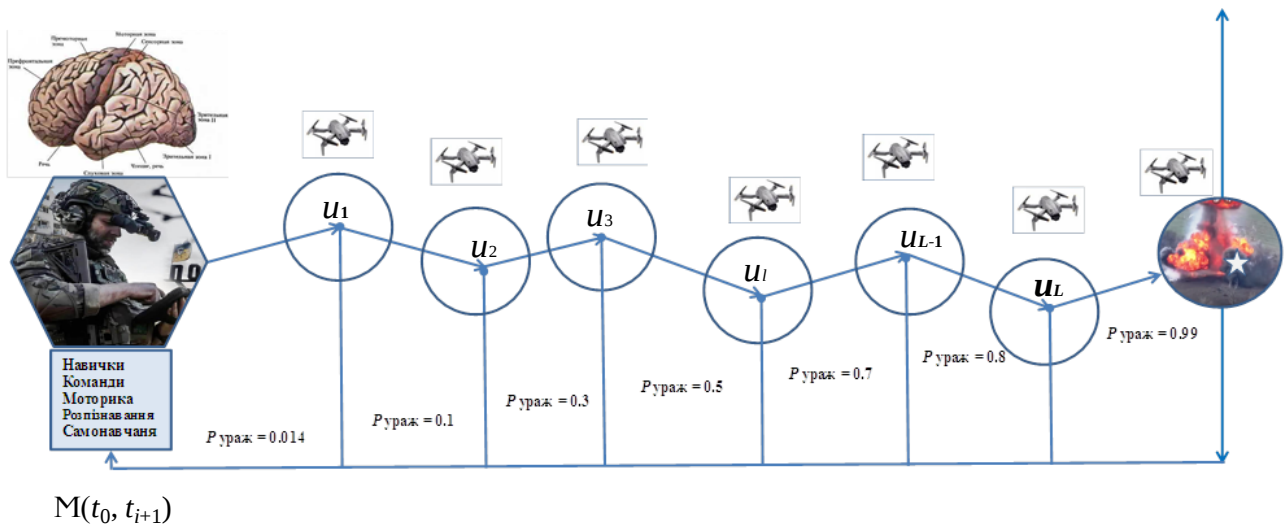


Рис. 2. Модель ручного управління дроном:

u_l – рішення ОБП на кроці $l = (1 \dots L)$; L – загальна кількість рішень ОБП під час виконання місії;
 $P_{\text{ураж}}$ – ймовірність ураження цілі на кроці l .

ОБП володіє унікальними функціональними можливостями, які забезпечують його ключову роль у процесі управління:

усвідомлений обмін бойовими командами та підтримка ефективної комунікації зі спостережними і виконавчими підсистемами;

розвинені моторні навички пілотування та маніпулювання органами керування, що забезпечують точність і чутливість реакції системи;

здатність орієнтуватися на місцевості та розпізнавати рельєф навіть за умов відсутності навігаційних засобів (зокрема GPS);

уміння ідентифікувати ворожі об'єкти, оцінювати пріоритети цілей і приймати рішення в умовах обмеженого часу;

висока адаптивність до навчання й самонавчання, що дозволяє ефективно підвищувати рівень підготовки в польових умовах.

Таким чином, у запропонованій концепції оператор розглядається як “вищий рівень” управління, що забезпечує гнучкість та адаптацію до змін оперативної обстановки. Це підкреслює необхідність подальших досліджень щодо оптимізації взаємодії між людиною та автоматизованими підсистемами, а також пошуку балансу між автономністю БП та контролем оператора у комбінованих режимах бойового застосування.

Методологічні передумови дослідження

Для спрощення моделювання процесів управління та підвищення точності результатів автори ввели низку припущень і обмежень:

ОБП є навчений, досвідчений та боєздатний;

дрон перебуває у стані повної боєготовності (100 %);

система GPS відключена;

умови видимості оцінюються як добрі;

вплив засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) відсутній.

За цих умов боєготовність ОБП ($B_{\text{ОД}}$) та боєздатність БП визначають ймовірність успішного ураження цілі. Висока ефективність БП досягається у випадку, коли показник ефективності ураження (E_y) наближається до одиниці ($E_y \rightarrow 1.0$).

У цьому разі, кількість успішних бойових місій дронів (N_y) має прагнути до кількості застосованих дронів (N_z), що формалізується виразом (1):

$$E_y = \frac{N_y}{N_z}, \quad (1)$$

де N_y – кількість успішних бойових місій;
 N_z – кількість застосованих дронів.

Модель боєздатності БП

Боєздатність БП в момент часу t_i ($B_{\text{БП}}(t_i)$) визначається як функція незалежних показників: надійності комплектуючих, якості складання та ефективності логістики, та описується рівнянням (2):

$$B_{\text{БП}}(t_i) = N_k(t_i) * Y_z(t_i) * L_{\text{БП}}(t_i), \quad (2)$$

де t_i – момент часу оцінювання параметрів;

$N_k(t_i)$ – надійність комплектуючих БП;

$Y_z(t_i)$ – якість збирання БП;

$L_{\text{БП}}(t_i)$ – успішність комплексної логістичного забезпечення.

Модель боєготовності ОБП

Боєготовність ОБП $B_{\text{ОД}}(t_i)$ визначається трьома основними чинниками: навченістю, бойовим досвідом (самонавчанням) та функціональним станом. Цю залежність описує вираз (3):

$$B_{\text{ОБП}}(t_i) = \mu_{\text{НОБП}}(t_i) * \mu_{\text{СОБП}}(t_i) * \Phi_{\text{ОБП}}(t_i), \quad (3)$$

де $\mu_{\text{НОБП}}$ – рівень навченості оператора;

$\mu_{\text{СОБП}}$ – бойовий досвід або здатність до самонавчання;

$\Phi_{\text{ОБП}}$ – поточний функціональний стан оператора.

Імовірність успіху бойової місії

Загальна ймовірність успіху місії ($Mission(1+)$) при незалежності параметрів $B_{\text{БП}}$ $B_{\text{ОБП}}$ визначається за формулою (4):

$$Mission(1+, t_0, t_i, \Pi u_i) = B_{\text{БП}}(t_0, t_i) * B_{\text{ОБП}}(t_0, t_i) * U(\Pi u_i), \quad (4)$$

де U – узагальнений показник якості рішень, що приймає оператор:

$U = 1$, якщо всі рішення є правильними;

$U = 0$, якщо хоча б одне рішення є помилковим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведений авторами аналіз наукових джерел показав, що попередні роботи переважно фокусуються на технічних, кінематичних та алгоритмічних аспектах функціонування БП, тоді як роль ОБП в чистій моделі ручного управління залишається недостатньо вивченою.

Так, у роботі [1], обґрунтовано функцію щільності розподілу цілей, що використовується для планування ефективного застосування БП (безпілотних літальних апаратів, БпЛА).

У [2] проаналізовано ефективність зенітно-ракетного комплексу “Стріла-10” при ураженні цілей типу БпЛА “Форпост”, що дозволяє оцінювати бойову результативність дронів-камікадзе порівняно з традиційними вогневими засобами.

Дослідження [3] застосовує алгебру дуальних кватерніонів для моделювання просторового руху БпЛА, що дозволяє поєднати поступальний та обертальний рух і підвищити точність симуляцій.

У [4] доведено, що метод наведення з динамічним упередженням є ефективнішим за пряме наведення, що відкриває перспективи для оптимізації ручного пілотування у бойових умовах.

У роботах [5; 6] розглядаються нейрофізіологічні основи навчання, сприйняття та прийняття рішень людиною, що має безпосереднє відношення до когнітивної моделі ОБП.

Джерело [8] присвячене автоматизованому розпізнаванню типів БП за їх радіосигналами, що відноситься до “нижчого рівня” управління, тоді як людський мозок реалізує “вищий рівень” управління (інтерпретації даними).

У [18] описано принципи створення автономних та розподілених робототехнічних систем, що формують основу для майбутніх досліджень у сфері автоматичного управління БП.

На думку авторів, вказані роботи [1–6; 8] недостатньо розкривають механізми діяльності ОБП у “чистій” моделі ручного управління, що визначає актуальність створення формалізованої моделі ОБП як “вищого рівня” управління.

Перспективними напрямками подальших досліджень автори статті вважають автоматизовані та автоматичні моделі управління, а також інтеграцію систем машинного зору та штучного інтелекту у контури взаємодії з ОБП з його вищим командуванням (керівником місії).

Метою статті є дослідження моделі ручного управління БП та оцінка ефективності роботи ОБП.

Виклад основного матеріалу

Опис моделі “ручного управління” БП

Автори розглядають модель “ручного управління” БП, що реалізується ОБП за умов, коли БП є босездатною, навігаційна система GPS відключена, рівень видимості оцінюється як задовільний, вплив засобів радіоелектронної боротьби відсутній, а системи машинного зору та штучного інтелекту не застосовуються. При цьому вважається, що ОБП перебуває у стані повної боеготовності.

В таблиці 1 вказано рівні управління, складові БП та їхні функції.

У зазначеній моделі ОБП реалізує “вищий рівень” управління БП, приймаючи рішення стратегічного характеру – зокрема щодо напрямку руху, висоти та маневрування БП. Подальша деталізація та реалізація цих команд виконується апаратно-програмним комплексом (АПК) БП, який функціонує на “нижчому (технічному) рівні” управління в автоматичному режимі у тривимірному просторі за координатами (крен (roll), тангаж (pitch), рискання (yaw)).

Завдяки здатності до мислення, навчання та самонавчання, ОБП забезпечує адаптивне управління БП на “вищому рівні”. Механізм передачі команд реалізується через тактильну моторику пальців, що формує сигнали управління пультом на основі когнітивної діяльності мозку оператора. Таким чином, на кожен момент часу t формується сукупність рішень і команд, які можна формально описати виразом $M_0(t_0, t_{b+1})$, що відображає динаміку формування й реалізації рішень оператора у часовому інтервалі від моменту ініціації керування (t_0) до моменту виконання чергового циклу (t_{b+1}).

У таблиці 1 наведено узагальнені пояснення до моделі “ручного управління”, які демонструють логіку прийняття рішень ОБП на “вищому рівні” та механізм реалізації команд АПК БП на “нижчому рівні” (технічному).

Таблиця 1

Рівні управління, складові БП та їх функції

Рівень управління БП	Задіяні складові БП	Функції, що відпрацьовуються складовою БП	Особливості
“Вищий рівень управління” (ручна складова моделі управління БП)	ОБП	1. Планування польоту. – визначення та прокладання маршруту руху БП; – формулювання місії (розвідка, ураження, моніторинг, доставка, відеозйомка тощо); – налаштування параметрів та режимів роботи автопілота відповідно до умов виконання завдання. 2. Управління у режимі реального часу. – здійснення ручного або напівавтоматичного керування польотом; – зміна висоти, швидкості та орієнтації БП у просторі; – виконання тактичних маневрів (зокрема, обліт перешкод, уникнення виявлення або ураження). 3. Контроль за виконанням польоту. – моніторинг основних параметрів функціонування БП (заряд акумулятора, стан двигунів, стабільність радіоканалу тощо); – аналіз та реагування на аварійні сигнали або втрату зв'язку; – прийняття рішень у нештатних або загрозливих ситуаціях з метою збереження босздатності БП та виконання поставленого завдання	
“Нижчий рівень управління” (АПК) (технічна складова моделі управління БП)	Бортовий обчислювальний модуль (БОМ) (мікроконтролери, процесорні плати (ARM, FPGA, SoC), інтерфейси введення-виведення та контролери шин (CAN, UART, I²C) Підсистема навігації та орієнтації (інерційна навігаційна система (IMU), барометричний висотомір, гіроскопи, акселерометри, магнітометри, GPS/GLONASS-приймачі)	1. Оброблення даних від сенсорів. 2. Реалізація алгоритмів стабілізації, навігації, керування та комунікації з пультом оператора Визначення просторового положення БП у трьохвимірному просторі (координати, висота, курс, крен, тангаж, ризикання)	Підтримує алгоритми реального часу (RTOS), має резервування критичних функцій і забезпечує обробку команд у межах мілісекундного інтервалу У випадку втрати GPS сигналу може переходити на інерційний або візуально-одометричний режим навігації

Рівень управління БП	Задіяні складові БП	Функції, що відпрацьовуються складовою БП	Особливості
	Система стабілізації та управління польотом (контролер польоту (Flight Controller), електронні регулятори обертів (ESC), сервоприводи, двигуни)	Реалізація низькорівневого керування двигунами та органами аеродинамічного управління, стабілізує положення БП	Працює у замкненому контурі із сенсорами та БОМ, підтримуючи стабільність польоту навіть при зовнішніх збуреннях
	Сенсорна підсистема (модулі сприйняття середовища) (оптичні та інфрачервоні камери, лідари, радари ближньої дії, ультразвукові датчики)	Збирання даних про навколишнє середовище для навігації, виявлення перешкод та цілей	У сучасних системах передбачено можливість інтеграції алгоритмів машинного зору та попередньої обробки зображень на борту
	Комунікаційна підсистема (радіомодулі (UHF/VHF), модеми передачі даних, антенні системи, криптографічні модулі захисту зв'язку)	Забезпечення двостороннього обміну інформацією між БП і пунктом управління або іншими платформами	Використовує стійкі до перешкод протоколи (FHSS, DSSS, MIMO) і може функціонувати у захищених каналах відповідно до стандартів NATO (STANAG 4586))
	Енергетична система (аккумуляторні батареї (LiPo, Li-Ion), системи керування живленням (Power Management Unit, BMS), резервні джерела енергії)	Забезпечення живлення всіх підсистем БП та контроль стану енергоресурсів	Може включати функцію автоматичного відключення неважливих підсистем при критичному рівні заряду для продовження часу польоту
	Корисне навантаження (модулі відеоспостереження, системи наведення, бойові блоки, системи захоплення та транспортування)	Виконання спеціалізованих завдань відповідно до типу місії (розвідка, спостереження, ураження, доставка, інше)	Підтримує інтеграцію з АПК для автоматичного керування та передавання даних у режимі реального часу
	Програмне забезпечення АПК (прошивки контролерів, системи реального часу (RTOS), алгоритми керування польотом, системи логування та аналізу даних)	Реалізація логіки роботи всіх апаратних компонентів, обмін даними, діагностику, безпечне оновлення прошивок і шифрування трафіку	Включає модулі ІШ або машинного навчання (у розширених версіях), що забезпечують адаптивну поведінку БП у динамічному середовищі

Головний мозок людини (ГМЛ) є високоорганізованою біологічною системою, сформованою еволюцією для забезпечення адаптивної, цілеспрямованої та ефективної життєдіяльності. У процесі навчання оператора управління БП ГМЛ набуває спеціалізованих функціональних властивостей і трансформується у головний мозок оператора безпілотної платформи (ГМОБП). Саме в ГМОБП формується операційний центр прийняття рішень “вищого рівня”, який відповідає за сприйняття зовнішніх сигналів, їх когнітивну обробку, збереження релевантної інформації та генерацію команд управління.

До ключових функцій ГМОБП належать: моторне керування польотом дрона; розпізнавання об'єктів, рельєфу та цілей; аналіз ситуаційних змін; обмін інформацією через сенсомоторні канали; формування та реалізація усвідомлених рішень щодо поведінки БП.

На рисунку 2 представлено узагальнену модель “ручного” методу управління БП, що відображає процес формування та реалізації рішення “вищого рівня” ОБП під час управління БП із наземного пункту управління.

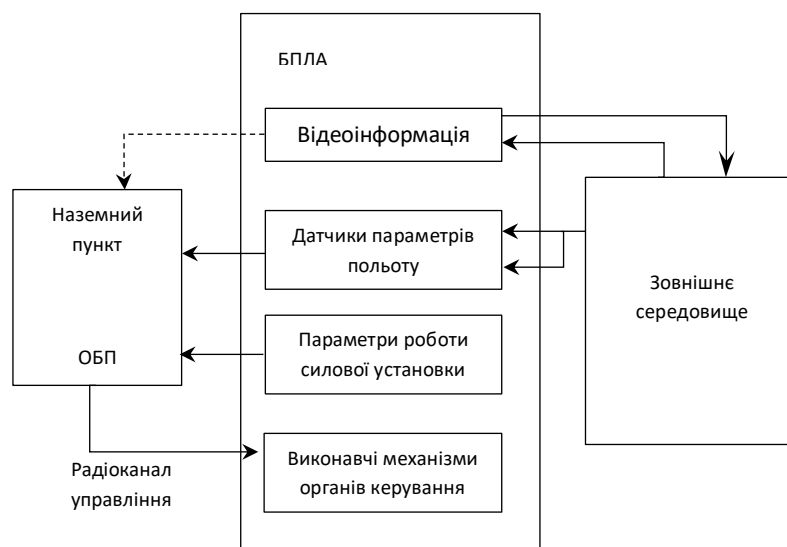


Рис. 2. Функціональна схема моделі “ручного” управління БП

Загальна модель сприйняття світу (МСС) – $M_{old}(t_0)$ – у головному мозку людини (ГМЛ) являє собою багаторівневу когнітивну структуру, яка формується в результаті індивідуального досвіду, навчання та сенсорної взаємодії з навколишнім середовищем. Вона складається з множини підмоделей $\mu_i(t_0)$, що утворюють систему знань, правил, навичок і поведінкових шаблонів, актуальних для моменту часу t_0 .

МСС фізично реалізована у вигляді біонейронних ансамблів (БНА) ГМЛ – стабільних нейронних структур, що відповідають за кодування та збереження інформації про зорові, слухові, тактильні та моторні образи. При цьому вербальні конструкції (думки у формі речень) нейрофізіологічно пов'язані аксонами з відповідними БНА, які репрезентують сенсорні або моторні патерни [5].

Таким чином, загальна МСС людиною на момент t_0 може бути формально представлена як множина спеціалізованих підмоделей $M_{old}(t_0)$, що описується виразом (5):

$$M_{old}(t_0) = \{\mu_1(t_0), \mu_2(t_0), \dots, \mu_{b-1}(t_0)\}, \quad (5)$$

де $b-1$ – індекс останньої підмоделі поведінки, сформованої людиною до моменту часу t_0 .

Модель $M_{old}(t_0)$ фіксується у масштабній біонейронній мережі людини (БНМЛ), яка налічує близько ста мільярдів нейронів. Із таким когнітивним багажем майбутній ОБП

прибуває до навчального центру. У процесі підготовки, що триває декілька місяців, здійснюється поетапна трансформація базових знань, навичок і поведінкових моделей новобранця в систему компетенцій оператора – $M_{ОБП}(t_i)$ на момент часу t_i , згідно з виразом (6):

$$M_{ОБП}(t_i) = M_{old}(t_i) + T(M_{old}(t_i)) + E(M_{new}(t_i)) + S(M_{new}(t_{i+1})), \quad (6)$$

де $T(M_{old}(t_i))$ – трансформація наявних поведінкових моделей;

$E(M_{new}(t_i))$ – формування нових навичок і знань у процесі навчання;

$S(M_{new}(t_{i+1}))$ – закладання основ для подальшого самонавчання.

Формування системи прийняття рішень ОБП відбувається послідовно у трьох фазах:

1. Фаза трансформації – адаптація існуючих (old) правил поведінки $M_{old}(t_0) \rightarrow T(M_{old}(t_i))$.

2. Фаза формування нових правил – утворення (new) моделей поведінки $E(M_{new}(t_i))$.

3. Фаза розвитку самонавчання – становлення механізмів $S(M_{new}(t_{i+1}))$, які забезпечують автономне вдосконалення компетенцій під час виконання бойових завдань.

Для того щоб новобранець перетворився на досвідченого оператора з оновленою моделлю сприйняття світу $M_{ОБП}(t_{i+1})$ на час t_{i+1} , біонейронні ансамблі (БНА-N) головного мозку мають засвоїти базові підмоделі поведінки відповідно до виразу (7):

$$M_o(t_0, t_{i+1}) \rightarrow \{\sum \mu_{old}(t_0), \sum T\mu_{old}(t_{i-1}), \sum E\mu_{new}(t_i), \sum S\mu_{new}(t_{i+1})\}, \quad (7)$$

де $\sum \mu_{old}(t_0)$ – поведінкові підмоделі, сформовані до початку навчання;

$\sum T\mu_{old}(t_{i-1})$ – модифіковані під час навчання правила поведінки;

$\sum E\mu_{new}(t_i)$ – нові навички, набуті в навчальному центрі;

$\sum S\mu_{new}(t_{i+1})$ – підмоделі самонавчання, що реалізуються під час діяльності ОБП у бойових підрозділах.

Унаслідок дії механізму самонавчання кількість поведінкових підмоделей $\sum S\mu_{new}(t_{b+1})$ постійно зростає.

Головний мозок оператора безпілотної платформи (ГМОБП) у своїй оперативній зоні (БНА – № 1) формує мізансцену всіх подій, включно з виконанням польотних завдань (місій) та зовнішніх умов, які надходять від сенсорних систем – $\tilde{G}_{Oper_i}(t_n, sensor)$.

Таким чином, у ГМОБП створюється когнітивна модель місії, на основі якої здійснюється прогнозування розвитку подій на кожному етапі (“l”) виконання завдання. ГМОБП безперервно аналізує ситуацію відповідно до сформованої бази правил, компетенцій і навичок – $Mo(t_0, t_{i+1})$ на момент часу t_{i+1} , та генерує рішення управління $\rightarrow u(l)$. Модель мізансцени отримує дані від сенсорів оператора щодо всіх зовнішніх та внутрішніх об’єктів, процесів і явищ для моделювання та прогнозування подальшого розвитку ситуації [14]:

$$ОБРАЗ = \tilde{G}_{Oper_i}(t, sensor, l, \mu\text{-правила}) \rightarrow u(l+). \quad (8)$$

Для цього ГМОБП використовує когнітивну мізансцену $\tilde{G}(\Delta t)$ як основу для аналізу сенсорних даних, що надходять від органів чуття оператора (зір, слух, дотик, нюх, смак). Завдяки інтеграції цих сигналів у просторі та часі, ГМОБП здатен:

передбачати розвиток подій для кожної аналізованої мізансцени – $\mu_{розвитку_подій}(+t_i) \rightarrow u(t_i, l+)$;

приймати рішення “вищого рівня” для апаратно-програмного комплексу (АПК) безпілотної платформи – $u_{рішенняВР}(t_{i+1}) \rightarrow u(t_{i+1}, l+)$;

генерувати тактильні команди управління – $\mu_{рух}(\Delta t_{i+2})$, що реалізуються через моторну активність пальців оператора на пульті керування.

На рисунку 3 схематично зображено процес безперервного приймання, обробки, зберігання та передачі сенсорної інформації у моделі ГМОБП. Система сенсорів представлена каналами: v – зоровий (очі), z – слуховий (вуха), s – смаковий (язик), n – нюховий (ніс), d – тактильний (шкіра, відчуття температури, болю, тиску).

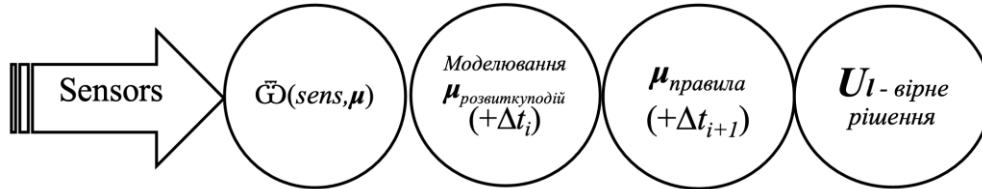


Рис. 3. Послідовність прийняття рішення u в ГМОБП

Функціональний ансамбль БНА – № 1 формує з цих сенсорних сигналів когнітивну мізансцену $\tilde{G}(sens, \mu)$, що включає інформацію про місце розташування оператора, стан пульта, динаміку рухів пальців, розпізнавання цілей та елементів місцевості у момент часу t_i . Отримана мізансцена $\tilde{G}_w$ далі оцінюється ГМОБП відповідно до актуальних компетенцій $\mu_i(t_i)$, після чого формується керуюче рішення u_l .

Таким чином, ГМОБП функціонує як адаптивна когнітивна система прогнозування і контролю, у якій поєднуються сенсорна інтеграція, когнітивне моделювання та моторна реалізація. Це забезпечує здатність оператора не лише реагувати на зміни зовнішнього середовища, але й проактивно формувати оптимальні дії у складних бойових сценаріях.

Модель підготовки ОБП

Розроблена модель підготовки ОБП $Mo(t_0, t_0+n_{mic})$ дозволяє формувати нормативи та вимоги до професійної та психофізіологічної підготовки ОБП до виконання бойових завдань у реальних умовах.

Успішність виконання місії визначається послідовністю своєчасно прийнятих і безпомилкових рішень оператора:

$$\{u_{1(+)}, u_{2(+)}, \dots, u_{L(+)}\},$$

де L – загальна кількість рішень у межах місії.

Формально місію можна подати як (9):

$$Mission(1(+), T_i) = \{u(t_{0(+)}), \dots, u(t_{i(+)}), \dots\}, \quad (9)$$

де $T_i = t_i - t_0$ – загальний час виконання місії.

Імовірнісна модель прийняття рішень

Імовірність прийняття правильного рішення на кожному кроці залежить від рівня сформованості у ГМОБП системи адекватних правил поведінки:

$$M(t_0, t_{i+1}) = \sum \mu_{old}(t_0) + \sum T \mu_{old}(t_{i-1}) + \sum E \mu_{new}(t_i) + \sum S \mu_{new}(t_{i+1}), \quad (10)$$

де μ_{old} – раніше засвоєні компетентності ОБП;

$T \mu_{old}$ – трансформовані (адаптовані) компетентності ОПБ;

$E \mu_{new}$ – нові знання, отримані під час місії;

$S \mu_{new}$ – нові сенсомоторні патерни поведінки ОБП.

Тоді ймовірність правильного рішення визначається як:

$$P(u_i) = \frac{M(t_i, t_{i+1})}{M_{max}(t_i, t_{i+1})} \rightarrow 1, \quad (11)$$

де M_{max} – максимально можлива система адекватних рішень ОБП.

Імовірність успіху місії

Загальна ймовірність успішного завершення місії ОБП за умови незалежності подій B_d та $B_{ОБП}$ описується виразом (12):

$$P_{mission}(1(+), L, T_i) = \prod_i (B_{ОБП.i}(\Delta t_i) * P(u_i)), \quad (12)$$

де $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ – часовий інтервал між послідовними рішеннями.

На початковому етапі місії (t_0) оператор отримує завдання і починає генерувати послідовність рішень u_i , що формують команди управління апаратно-програмним комплексом (АПК) дрону:

$$u_p = g(u_1, u_2, \dots, u_L), \quad (13)$$

де u_p – сукупність керуючих дій оператора;

g – функціональна модель процесу “ручного управління” БП.

Імовірнісна оцінка успішності місії

Перший компонент моделі – це ймовірність успіху місії $P(Mission(L+))$. Якщо ймовірність того, що оператор на кожному кроці приймає правильне рішення, дорівнює p , і всі L рішень є незалежними (14):

$$P(Mission(L+)) = P_{success}(+, L, p) = p^L. \quad (14)$$

Результат місії є булевою величиною, що приймає значення:

1 – місія успішно виконана;

0 – місія провалена.

Таким чином, при кількості рішень $L = 50$ загальна ймовірність успіху дорівнює:

$$P_{success}(+) = p^{50}.$$

На рисунку 4 наведено приклад графіка залежності $P_{success}(L)$ від параметра $p \in [0; 1]$. За умови, що ОБП приймає всі рішення вірно ($p = 1$), ймовірність успішного виконання місії дорівнює (15):

$$P_{mission}(L; p) = p^L = Mission(50; 1, 0) = 1. \quad (15)$$

На рисунку 4 відображено графік залежності ймовірності успіху місії при кількості рішень ОБП $L = 50$ від ймовірності прийняття правильних рішень $p \in (0, 9; 1, 0)$.

Другим компонентом розробленої моделі є часова затримка τ , яка визначається сумарним часом прийняття рішення оператором u_i та часом відпрацювання відповідної команди АПК БП (16):

$$\tau_i = \Delta t_{u,i} + T_{АПК,u,i}. \quad (16)$$

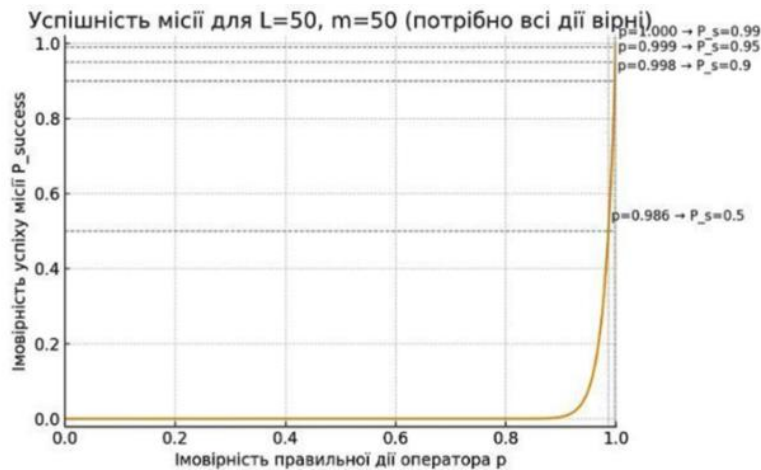


Рис. 4. Графік залежності ймовірності успіху місії від ймовірності правильних дій ОП

На рисунку 5 наведено результати моделювання інерційності системи управління дроном у режимі “ручного управління”.

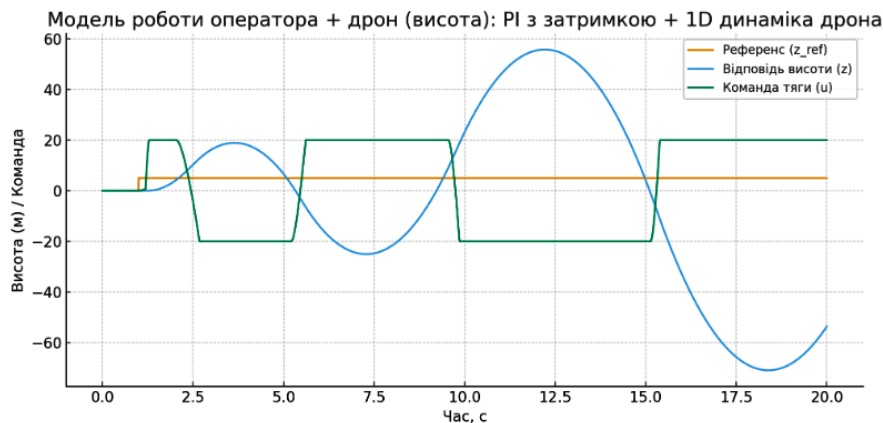


Рис. 5. Графік демонстрації інертності моделі “ручного управління” БП

Інертність реакції системи на рішення u_i зумовлює можливість виходу за допустимі часові межі τ_i , що, у свою чергу, може призвести до порушення часової послідовності виконання команд та, як наслідок, до неможливості успішного завершення місії.

За умови повної боєздатності, БП ($B_d = 1.0$), вирішальним чинником успіху місії стає ефективність дій ОП ($E_{ОП}$), яка вимірює здатність оператора генерувати безперервну послідовність правильних і вчасно виконаних команд для АПК БП. Формалізація цього показника наведена в рівнянні (17):

$$E_{ОП} = B_{ОП} \cdot \frac{\sum_{l=1}^L CrU_l}{L}, \quad (17)$$

де L – загальна кількість рішень у місії;
 $B_{\text{ОБП}}$ – коефіцієнт боєготовності ОБП;
 CrU_l – індикатор успіху на кроці l (детальніше нижче).

Успіх кожного кроку CrU_l визначається одночасною наявністю (l) правильного рішення оператора $u_{\text{ОБП},l}$ та своєчасної реалізації цього рішення АПК БП. Це формалізується як (18):

$$CrU_l = u_{\text{ОБП},l} \cdot \tau_{u,l}, \quad (18)$$

де $u_{\text{ОБП},l} = 1$, якщо рішення l – є коректним (веде до успіху), і $u_{\text{ОБП},l} = 0$ – якщо рішення хибне;
 $\tau_{u,l}$ – бінарний індикатор своєчасності реалізації рішення (19).

$$\tau_{u,l} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } (\Delta t_{u,\text{ОБП},l} + \Delta t_{\text{АПК},l}) < \tau_{\text{max}} \\ 0, \text{ інакше} \end{cases}, \quad (19)$$

де $\Delta t_{u,\text{ОБП},l}$ – час прийняття рішення оператором на кроці l ;
 $\Delta t_{\text{АПК},l}$ – час відпрацювання цієї команди АПК;
 τ_{max} – максимально допустима затримка для збереження життєздатності місії на цьому етапі.

Фактором загального успіху місії є сума послідовно своєчасно виконаних правильних рішень ОБП, яку можна оцінити як суму індикаторів кроків (20):

$$C_{\text{mission}}(L+) = \sum_{l=1}^L CrU_l. \quad (20)$$

Якщо для виконання місії необхідно реалізувати L своєчасних і коректних рішень, то умова успіху еквівалентна $C_{\text{mission}}(L+) = L$, інакше, при $C_{\text{mission}}(L+) < L$, місію вважатимуть нездійсненою.

Імовірнісна оцінка успіху місії формується із врахуванням імовірності коректності прийняття рішення $P(u_l)$ та фактора своєчасності CrU_l . Один із варіантів такої оцінки має вигляд (21):

$$P_{\text{mission}}(1(+), L, T_l) = B_{\text{ОБП}} \cdot \frac{\sum_{l=1}^L P(u_l) \cdot CrU_l}{\sum_{l=1}^L P(u_l) \cdot CrU_l^{\text{max}}}, \quad (21)$$

де CrU_l^{max} – нормувальний множник для кроку l (максимально можлива оцінка успіху кроку при оптимальних умовах). Відповідно, ймовірність провалу місії (22):

$$P_{\text{mission}}(L-) = 1 - B_{\text{ОД}} \cdot \frac{\sum_{l=1}^L P(u_l) \cdot CrU_l}{\sum_{l=1}^L P(u_l) \cdot CrU_l^{\text{max}}}. \quad (22)$$

Статистичний аналіз бойової діяльності підрозділів СБС показує [19], що для досягнення високої ймовірності успіху вимоги до послідовності рішень стають жорсткими. Наприклад, якщо в місії $P(E_{\text{mission}}(2000+))$ всі 2000 рішень ОБП будуть коректними та виконані вчасно, то послідовність $\{u_{2000}\}$ забезпечує завершення місії з імовірністю $P(E_{\text{mission}}(2000+)) = 1$. Другий приклад – ураження цілі дроном-камікадзе, або успішне завершення розвідувальної задачі. На рисунку 6 показано, що ймовірність успіху зростає зі збільшенням кількості підряд ідентично правильних рішень оператора [18].

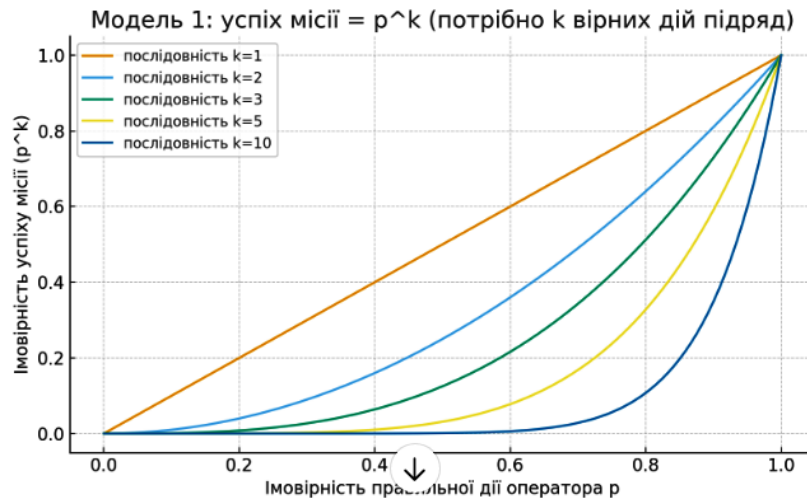


Рис. 6. Графік залежності успіху місії при кількості вірних дій ОБП підряд при $k = [1, 2, 3, 4, 5, 10]$

Наприклад, для забезпечення практично гарантованого успіху складної місії (в умовах $L \approx 1000$ кроків), статистичні дані [18] вказують на необхідність досягнення мінімальних значень ключових показників на рівні:

$$B_{\text{БП}}^{\min} > 0,99 \text{ (боездатність БП);}$$

$$B_{\text{ОБП}}^{\min} > 0,995 \text{ (боєготовність оператора).}$$

Аналіз моделі “ручного управління” БП та статистики бойового застосування [19] показує наступні емпіричні інтервали ефективності оператора ($E_{\text{ОБП}}^{N \text{ міс}}$) залежно від тривалості підготовки:

новачок (0 місяців навчання): $E_{\text{ОБП}}^{0 \text{ міс}} \approx 0,00 - 0,01$;

після 1 місяця навчання: $E_{\text{ОБП}}^{1 \text{ міс}} \approx 0,3 - 0,5$;

після 3 місяців навчання: $E_{\text{ОБП}}^{3 \text{ міс}} \approx 0,90 - 0,95$;

досвідчений оператор (≥ 12 місяців у бойовому підрозділі): $E_{\text{ОБП}}^{12 \text{ міс}} \approx 0,95 - 0,99$.

Ключовим параметром розвитку здібностей оператора є **коефіцієнт навчальності** $K_{\text{НОБП}}$, який характеризує темпи здобуття нових навичок у процесі формальної підготовки, емпіричний інтервал для цього показника оцінюється як (23):

$$K_{\text{НОБП}} \in [0,90 - 0,99]. \quad (23)$$

Під час експлуатації в бойовому підрозділі важливим є також **коефіцієнт самонавчальності** $K_{\text{СНОБП}}$, що відображає здатність оператора самостійно генерувати та інтегрувати нові бойові підмоделі у реальних умовах. Для бойових підрозділів СБС автори рекомендують орієнтовний інтервал самонавчальності, згідно з (24), що свідчить про високу здатність до оперативного самовдосконалення на фронті.

$$K_{\text{СНОБП}} \in [0,90, 0,95]. \quad (24)$$

Завдяки самонавчальності оператор може самостійно генерувати, перевіряти та впроваджувати нові ефективні бойові рішення, що призводить до розширення простору бойових підмоделей – набору правил, навичок і компетенцій (25).

$$\{\sum Mo + S\mu_{new_i}(t > 12 \text{ міс})\}. \quad (25)$$

Для систем штучного інтелекту (ШІ) коефіцієнт формальної навчальності $K_{H,ШІ}$, на думку авторів, може варіюватися в межах (26), залежно від якості алгоритмів, даних навчання та діяльності конструкторів і інженерів.

$$K_{H,ШІ} \in [0,0 - 1,0]. \quad (26)$$

Натомість коефіцієнт ефективного самонавчання ШІ у польових бойових умовах, без доступу до репрезентативних міток або людської корекції, автори вважають близьким до нуля (27).

$$K_{CHШІ-МЗ} \approx 0,0. \quad (27)$$

Це означає, що наразі автономні системи рідко демонструють значиме самостійне покращення бойових компетенцій без зовнішнього донавчання та інженерної підтримки [18].

На рисунку 7 наведений графік емпіричної залежності ефективності оператора БП $E_{ОБП}$ від часу навчання та подальшої служби в бойовому підрозділі СБС. З огляду на отримані оцінки, для планування підготовки персоналу та формування нормативів боєздатності доцільно використовувати поєднання індикаторів $B_{БП}$, $B_{ОБП}$, $K_{НОБП}$ та $K_{СНОБП}$, як вхідних параметрів при моделюванні ймовірності успіху складних місій.



Рис. 7. Графік оцінки ефективності дій ОБП під час навчання та подальшого самонавчання

Під час тримісячного курсу підготовки в навчальному центрі ОБП послідовно опановує, закріплює та удосконалює **набори базових бойових правил і моделей поведінки** $\mu_{ОБП}$, які відображають його алгоритми прийняття рішень у процесі управління БП. Завдяки систематичному тренуванню досягається поступове зростання рівня компетентності до максимально можливого значення (28).

$$M(t_{3 \text{ міс}}) \rightarrow \max E_{ОБП}^{3 \text{ міс}}. \quad (28)$$

Це свідчить про набуття ОБП стійких навичок контролю польоту, орієнтування в бойовій обстановці, реагування на перешкоди та ефективного виконання бойових завдань у межах типових сценаріїв.

Після переходу до служби у бойовому підрозділі сил безпілотних систем (СБС), оператор стикається з новими, непередбачуваними обставинами ведення бойових дій, для яких відсутні

раніше сформовані шаблони дій або напрацьовані заходи реагування. У таких умовах активізується **механізм самонавчання**, який можна описати як появу нових підмножин бойових правил (29), що відображають процес самостійного формування ОБП нових тактичних моделей, прийомів управління та адаптивних стратегій застосування БП, що відображають процес самостійного формування ОБП нових тактичних моделей, прийомів управління та адаптивних стратегій застосування БП.

$$\sum SM_{new_i}(t_{6-12 \text{ mic}}). \quad (29)$$

Таким чином, на етапі бойової служби формується **друга фаза розвитку компетентності оператора** – фаза самонавчання, у якій індивідуальний досвід і практична діяльність безпосередньо перетворюються на нові тактичні знання, що підвищують загальну ефективність виконання місій (30).

$$E_{\text{ОБП}}(t_{12 \text{ mic}}) = f(M_{\text{баз}}, \sum SM_{new_i}). \quad (30)$$

Цей процес має ключове значення для підвищення гнучкості та автономності дій ОБП, особливо у випадках, коли динаміка бойової обстановки вимагає прийняття нестандартних рішень у реальному часі.

Висновки

Таким чином, авторами статті досліджено модель “ручного управління” БП і проведено оцінку ефективності роботи ОБП. Ключові результати та положення наступні:

1. Показано, що ОБП у своїй роботі використовує природні когнітивні й сенсорні можливості головного мозку (оцінка візуальної інформації, сприйняття та генерація звукових команд, здатність до навчання і самонавчання), що забезпечує високий рівень адаптивності в умовах змінної оперативної обстановки.

2. Команди, сформовані на основі системи компетенцій ОБП, реалізують управління “вищого рівня” – визначають тактичні цілі та пріоритети дій. АПК БП переводить ці рішення у технічні дії на “нижчому рівні” (реалізаційному).

3. Запропонована модель “ручного управління” дозволяє імітувати та аналізувати тактичні наслідки діяльності ОБП у бойових умовах, зокрема вплив людського фактора на результати місій.

4. У статті розглянуто набір корисних коефіцієнтів та метрик для прогнозування успіху місії, зокрема ефективність дій ОБП ($E_{\text{ОБП}}$), боєздатності БП, боєготовності ОБП, а також показників навчаємості і самонавчаємості ОБП. Ці метрики можуть використовуватись для кількісної оцінки ризиків та оптимізації розподілу ролей між людиною й автоматикою.

5. Як перспективний напрям подальших досліджень визначено розробку та валідацію моделі “автоматичного управління” БП, а також дослідження комбінованих режимів взаємодії “людина – система” з метою підвищення загальної стійкості й ефективності управління в бойових сценаріях.

Надані результати формують теоретичну основу для подальшої розробки гібридних архітектур управління, що поєднують переваги людини-оператора з можливостями сучасних апаратно-програмних та інтелектуальних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пулеко І. В., Чумакевич В. О., Шестак І. М., Рикун В. Л., Свистунович І. В. Функція щільності розподілу цілей для планування застосування безпілотних літальних апаратів // Збірник наукових праць ЖВІ. Житомир, 2024. Вип. 27. С. 69–80.

2. Кудряшов В. Є., Литовченко Д. М., Воїнов В. В., Хроль Л. О., Куценко В. В. Ефективність стрільби ЗРК “Стріла-10” при виявленні цілей через оптичний визирь і автоматизованій цілевказівці // Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОВТ. Черкаси, 2023. Вип. 4 (18). С. 41–48.
3. Пулеко І. В., Андрєєв О. В., Дубина О. Ф., Чумакевич В. О., Паламарчук А. С. Модель руху безпілотних літальних апаратів на основі алгебри дуальних кватерніонів // Збірник наукових праць ЖВІ. Житомир, 2022. Вип. 23. С. 52–61.
4. Геращенко М. М., Нестеренко С. О., Ісаченко О. О., Лось А. М., Сірик О. М. Моделі автоматичного наведення ударних безпілотних літальних апаратів на рухому ціль // Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОВТ. Чернігів, 2021. Вип. 2 (8). С. 20–30.
5. Куцаєв В. В., Лазута Р. Г., Головка О. Є., Самелюк В. П. Обрис поширеної телекомунікаційної моделі нейрона // Вісник ВІТІ. Комунікаційні та інформаційні системи. 2024. № 1 (5). С. 32–46.
6. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофстедтер Л. Мозок, розум і поведінка. Редакція біологічної літератури / Переклад з англ. канд. біол. наук Є. З. Годіної // RoyalLib: електронна бібліотека. URL: https://royallib.com/book/blum_floyd/mozg_razum_i_povedenie.html (дата звернення: 19.10.2022).
7. Вентцель Е. С. Теорія ймовірностей. 6-е вид. Вищ. шк. В., 1999. С. 134.
8. Нагорнюк О. А. База даних для автоматизованого розпізнавання типу безпілотного авіаційного комплексу за його радіосигналами // Збірник наукових праць ЖВІ. 2023. Вип. 25 (І).
9. Альберт Енштейн. Теорія здобутку нових знань. Education for Independent Thought», New York Times, 1952.
10. Бернацький А. П. Основи робототехніки військового призначення / А. П. Бернацький. Київ: ЛІРА-К, 2024. 498 с.
11. Ладієва Л. Р. Методи оптимізації та пошуку оптимальних рішень: елек. мережне навч. вид-ня / Укл. Л. Р. Ладієва. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 73 с.
12. Матвійчук Р. Д., Данільчук О. М. Порівняння найвідоміших алгоритмів пошуку / Вісник студентського наукового товариства ДонНУ імені Василя Стуса. 2022. С. 230–234.
13. Гібсон К. Р. Еволюція людського інтелекту: ролі розміру мозку та розумової побудови // Поведінка мозку та еволюція. 2002. № 59. С. 10–20.
14. Мартін А. Представлення предметних понять в мозку // Щорічний огляд психології. № 58. С. 25–45.
15. Шерман С. М., Гільєри Р. В. Дослідження таламуса і його ролі в корковій функції. 2-ге вид. Кембридж, Массачусетс: MIT Press, 2006.
16. Олег Печененко, Ярослав Ярошенко, Олександр Блискун. Питання бойового застосування військових частин та підрозділів державної авіації України, зенітних ракетних, радіотехнічних та спеціальних військ, зв'язку, радіотехнічного забезпечення та автоматизації управління. Загальні підходи до оцінювання ефективності протиповітряної оборони з урахуванням застосування FPV-дронів-перехоплювачів // Повітряна міць України. 2024. Том 2. № 7. С. 50–54.
17. Горбачов К. М. Часткова методика оцінювання ефективності забезпечення бойових дій підрозділів протиповітряної оборони військових формувань тактичного рівня засобами ураження // Збройна боротьба: теорія, забезпечення, досвід. 2021. № 4 (70). С. 15–21.
18. Бернацький А. П. Практичне програмування роботів: GAZEBO Military Edition: навч. посіб. Київ: Видавництво “Ліра-К”, 2025.
19. Щоденна статистика уражень дронами // URL: <https://dev.ua/news/stata-sbs-1750842989> (дата звернення: 25.06.2025).