

Є.С. Пуховський, д.т.н., проф.
Д.Ю. Ткачук, аспірант
О.О. Добржанський, к.т.н., доц.
В.В. Барабаш, студент

Державний університет «Житомирська політехніка»

Інтелектуальний НМІ для управління БПЛА: архітектура, адаптивна прозорість та імітаційне оцінювання

У статті запропоновано концепцію інтелектуального людино-машинного інтерфейсу (Human-Machine Interface, HMI) для управління безпілотним літальним апаратом у режимах manual, shared та supervisory control. Актуальність дослідження обумовлена зростанням обсягу телеметрії, відеоданих, повідомлень бортової аналітики та ризиком когнітивного перевантаження оператора у задачах моніторингу, пошуку, інспекції й тактичного застосування БПЛА. Метою роботи є формалізація архітектури HMI, визначення показників адаптації інтерфейсу та побудова аналітичної моделі, що узгоджує ситуаційну обізнаність, точність команд, затримку керування, когнітивне навантаження й операційний ризик. Запропоновано багатошаровий HMI, який поєднує польотний контур, шар семантичної візуалізації, модуль оцінювання навантаження оператора, блок пояснення рішень автономії та менеджер режимів взаємодії. Для перевірки працездатності концепції виконано імітаційне моделювання, тому наведені графіки відображають прогностичні залежності, а не результати натурних льотних випробувань. За результатами моделювання адаптивний HMI зменшує оцінене когнітивне навантаження в середньому на 19,3 %, скорочує час реакції оператора до 0,83 с у supervisory-режимі та забезпечує відносний приріст інтегральної ефективності до 26,5 % за умов погіршення каналу зв'язку. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення наземних станцій керування, інтерфейсів планування місії та адаптивних засобів підтримки оператора.

Ключові слова: HMI; БПЛА; адаптивний інтерфейс; ситуаційна обізнаність; когнітивне навантаження; прозорість автономії; телеметрія; supervisory control.

Актуальність теми. Сучасні безпілотні літальні апарати дедалі частіше працюють не як окремі платформи дистанційного керування, а як елементи складних кіберфізичних систем, у яких оператор одночасно взаємодіє з автопілотом, модулем комп'ютерного зору, навігаційним контуром, засобами передачі даних та логікою місії. У такому середовищі інтерфейс оператора перестає бути лише панельлю індикації: він перетворюється на критичний компонент безпеки, від якого залежать швидкість прийняття рішень, калібрування довіри до автономії та здатність людини своєчасно перехопити керування.

Проблема ускладнюється тим, що з підвищенням рівня автономності зростає не лише продуктивність місії, а й потреба в прозорості дій бортових алгоритмів. Оператор повинен розуміти, що саме бачить система, чому вона пропонує певну траєкторію, наскільки надійним є розпізнавання цілі, які обмеження накладають стан каналу зв'язку й енергетичні ресурси платформи. Надлишкова інформація призводить до перевантаження, а її нестача – до втрати ситуаційної обізнаності та формування помилкових ментальних моделей. Саме тому для БПЛА актуальним є створення інтелектуального HMI, який адаптує форму подання даних до поточного ризику, стану мережі, впевненості автономії та прогнозованого когнітивного стану оператора.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Питання проєктування інтерфейсів керування БПЛА та їхній вплив на когнітивне навантаження систематизовано в оглядовій роботі [1], де запропоновано розглядати інтерфейс як один із ключових факторів продуктивності в задачах supervisory control. Дослідження адаптивних HMI показують, що зміна візуальних стимулів відповідно до контексту задачі може знижувати суб'єктивне навантаження операторів [2]. У контексті людино-автономної взаємодії для багатоагентних систем встановлено, що рівень автономії істотно впливає на точність виконання місії, довіру й командну динаміку [3].

Окрему групу робіт присвячено ергономічним аспектам засобів введення та оцінюванню придатності сенсорних інтерфейсів для спільних місій manned/unmanned aviation [4]. Для адаптивного керування корисними є підходи, у яких людський стан і складність місії розглядаються як формальні індикатори вибору режиму взаємодії; такий підхід розвинуто в дослідженні МІСАН для human-swarm teaming [5]. Паралельно розвиваються методи оцінювання навантаження операторів за когнітивними моделями, фізіологічними показниками, eye-tracking та NASA-TLX, що дає підстави інтегрувати предиктори перевантаження безпосередньо в HMI [6, 11].

Систематичний огляд з проблеми прозорості агентів доводить, що правильно інтегрована інформація про логіку автоматизації сприяє зростанню ситуаційної обізнаності та покращує продуктивність без істотного збільшення ментального навантаження [7]. Разом з тим у teleoperation-дослідженнях наголошується, що навіть за наявності сучасних алгоритмів управління основним вузким місцем часто залишається саме операторський інтерфейс, який має будуватись за користувачко-орієнтованими принципами [8]. Актуальність цієї тези підтверджують і нові експериментальні роботи, де помилки автоматизації в UAS-середовищах безпосередньо збільшують навантаження та знижують довіру [9], а дослідження з реальними UAS-командами підкреслюють залежність ефективності від рівня автономії, контексту місії та ресурсних обмежень [10].

Отже, аналіз літератури свідчить про наявність наукового підґрунтя для переходу від статичних наземних станцій керування до інтелектуальних НМІ, які поєднують адаптивну візуалізацію, моделі навантаження, прозорість автономії та динамічний розподіл ролей між людиною і бортовою системою. Однак для практичної реалізації такого підходу потрібна цілісна архітектура, формалізований критерій ефективності та узгоджені правила перемикавання режимів взаємодії.

Метою статті є розроблення концепції інтелектуального НМІ для управління БПЛА, який забезпечує адаптивне подання інформації, підтримує прозорість рішень автономії та дозволяє формально узгодити ситуаційну обізнаність оператора, точність управління, затримку каналу, когнітивне навантаження та операційний ризик. Додатковим завданням є імітаційне оцінювання запропонованого підходу на основі аналітичної моделі.

Викладення основного матеріалу.

1. Функціональна архітектура інтелектуального НМІ. Запропонований НМІ доцільно розглядати як багатoshарову програмно-апаратну систему (рис. 1).

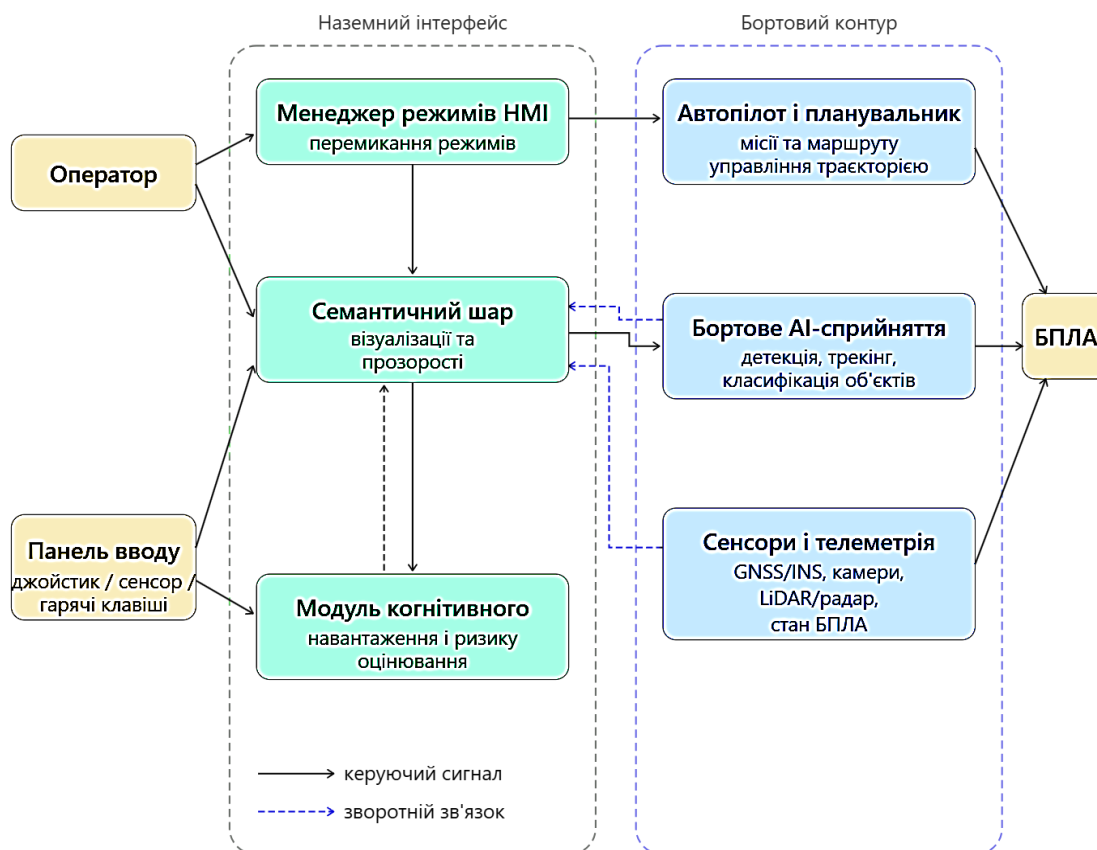


Рис. 1. Архітектура інтелектуального НМІ для управління БПЛА (авторська розробка)

На першому рівні розміщується оператор з панеллю вводу, що може включати джойстик, сенсорний екран, фізичні перемикачі режимів та контекстні гарячі клавіші. Другий рівень – наземний інтерфейс, у якому виділено менеджер режимів, семантичний шар візуалізації та модуль оцінювання навантаження і ризику. Третій рівень утворює бортовий контур БПЛА: автопілот, бортове AI-сприйняття, сенсори, телеметрія та виконавчі системи. Важливо, що інформаційний обмін між рівнями організовано не за принципом «максимум сирих даних оператору», а за принципом «релевантний контекст у потрібний момент».

Функціонально НМІ має виконувати п'ять груп задач: 1) індикація польотного стану та безпечних обмежень; 2) просторове уявлення про місію, траєкторію, геозони та критичні об'єкти; 3) подання результатів бортового AI-сприйняття у семантично згорнутій формі; 4) пояснення причин автоматичних рішень і прогнозування їхніх наслідків; 5) керування рівнем автономії та можливістю безпечного перехоплення керування. Таким чином, інтерфейс має бути не лише інформаційним, а й координаційним середовищем для взаємодії людини та автономного агента.

Семантичний шар НМІ доцільно структурувати за пріоритетами. Критичні сигнали безпеки (втрата зв'язку, конфлікт висоти, небезпечна відстань до перешкоди, критичний заряд батареї) повинні подаватися безпосередньо у центральній зоні уваги. Інформацію рівня місії – навігаційні маркери, запропоновані маршрути, класифікацію цілей, якість GNSS, стан корисного навантаження – слід відображати у вигляді агрегованих карток, піктограм і коротких пояснень. Сирі відеодані та детальна телеметрія повинні бути доступні за запитом або автоматично розгортатися лише тоді, коли система фіксує зростання ризику або зниження впевненості автономії.

2. Математична модель адаптації інтерфейсу. Для формалізації якості НМІ введемо інтегральний критерій ефективності J , який враховує нормовані показники ситуаційної обізнаності, точності команд, когнітивного навантаження, затримки реакції та ризику. Такий критерій дозволяє порівнювати альтернативні конфігурації інтерфейсу й керувати процесом адаптації.

$$J = w_{SA} \cdot \hat{S} + w_Q \cdot \hat{Q} - w_W \cdot \hat{W} - w_L \cdot \hat{L} - w_R \cdot \hat{R}, \quad \sum_i w_i = 1. \quad (1)$$

У виразі (1) величини \hat{S} , \hat{Q} , \hat{W} , \hat{L} та \hat{R} належать інтервалу $[0; 1]$, а вагові коефіцієнти визначаються умовами місії. Для спостережних задач із високими вимогами до безпеки доцільно підвищувати вагу ситуаційної обізнаності й ризику, тоді як для інспекційних задач з обмеженим часом – вагу затримки та точності команд.

Оцінювання навантаження оператора $W(t)$ можна подати як функцію щільності подій, кількості одночасно видимих відеос шарів, числа активних попереджень, коефіцієнта адаптації та коефіцієнта досвіду оператора.

$$W(t) = \alpha_1 \cdot N_e(t) + \alpha_2 \cdot N_v(t) + \alpha_3 \cdot N_a(t) - \alpha_4 \cdot A(t) - \alpha_5 \cdot E(t). \quad (2)$$

Формула (2) відображає той факт, що навантаження зростає зі збільшенням кількості подій $N_e(t)$, одночасних візуальних шарів $N_v(t)$ і тривожних повідомлень $N_a(t)$, але зменшується зі зростанням ефективності адаптації $A(t)$ та досвіду $E(t)$. На практиці $W(t)$ може оцінюватися як за оперативними показниками інтерфейсної взаємодії, так і за допомогою eye-tracking, фізіологічних або поведінкових індикаторів [6, 11].

Ризик $R(t)$ доцільно формувати як функцію довіри до автономії, поточного навантаження, сумарної затримки та втрат пакетів у каналі зв'язку:

$$R(t) = \lambda_1 \cdot (1 - C_a(t)) + \lambda_2 \cdot \frac{W(t)}{100} + \lambda_3 \cdot \frac{\tau(t)}{\tau_{\max}} + \lambda_4 \cdot P_{loss}(t), \quad (3)$$

де $C_a(t)$ – оцінка впевненості або довіри до автономії, $\tau(t)$ – поточна затримка контру керування, $P_{loss}(t)$ – відносні втрати пакетів, а λ_i – коефіцієнти важливості. Якщо ризик перевищує порогове значення, НМІ має автоматично спростувати подання другорядної інформації, переводити оператора до більш детермінованого режиму взаємодії та виводити пояснення причин зміни стану.

Вибір режиму взаємодії $M(t)$ визначається логікою порогового перемикавання між manual, shared та supervisory control:

$$M(t+1) = \begin{cases} M_{sup}, & \text{якщо } C_a \geq \theta_c \text{ і } W \leq \theta_w \\ M_{shared}, & \text{якщо } \theta_c \leq C_a < \theta_w \\ M_{manual}, & \text{якщо } C_a < \theta_c \text{ або } R > \theta_r \end{cases}. \quad (3)$$

Отже, при високій впевненості автономії та прийнятному навантаженні оператор може виконувати функцію нагляду, а при зниженні довіри або зростанні ризику система повертає більший обсяг контролю людині. Застосування такого правила запобігає як надмірній автоматизації, так і небезпечному ручному перевантаженню оператора.

3. Принцип адаптації НМІ. Практично цикл адаптації інтерфейсу реалізується як безперервний зворотний зв'язок між телеметрією, оцінкою стану оператора, блоком вибору автономності та модулем візуалізації. На кожному кроці система визначає, які саме елементи повинні залишатися в полі фокусу, які можуть бути агреговані, а які – приховані до запиту.

Якщо навантаження зростає, інтерфейс повинен зменшувати щільність дрібнодеталізованих даних, замінювати числові параметри категоріями стану, об'єднувати споріднені тривоги та збільшувати частку пояснювальних семантичних повідомлень. Якщо ж ризик підвищується через невизначеність алгоритмів або деградацію каналу, система, навпаки, розгортає додаткові підтверджувальні елементи: confidence score детекції, часову оцінку доступності каналу, підставу для запропонованого маршруту та рекомендації щодо перехоплення керування.

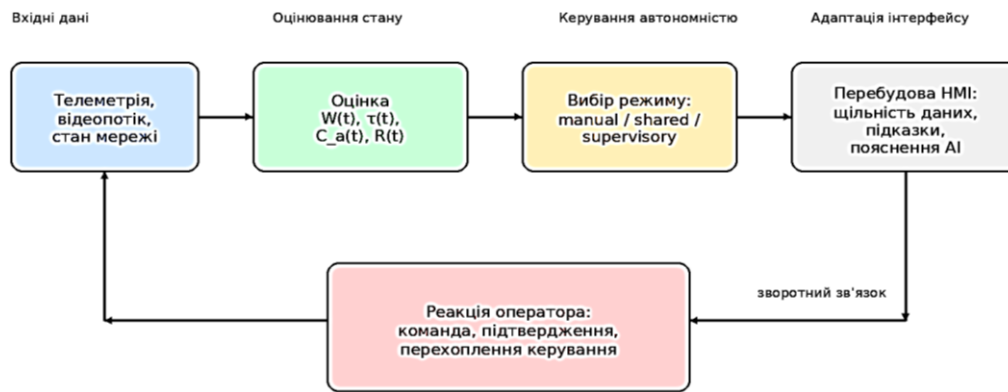


Рис. 2. Цикл адаптації інтерфейсу під стан оператора і середовища (авторська розробка)

Особливу увагу слід приділяти прозорості автономії. У safety-critical системах недостатньо показати лише результат роботи AI-модуля; оператору важливо знати, чому саме система зробила таке припущення, які дані були використані та якою є міра невизначеності. Тому в HMI варто передбачати короткі пояснювальні шаблони на кшталт: «маршрут змінено через виявлення перешкоди з достовірністю 0,87» або «ціль класифіковано як транспортний засіб на підставі контурної та теплової ознак».

4. Імітаційне оцінювання запропонованого підходу. Для попередньої перевірки працездатності концепції виконано чисельний експеримент у середовищі Python. Метою моделювання було оцінити, як адаптивний HMI впливає на навантаження оператора, час реакції та інтегральний критерій ефективності порівняно зі статичною конфігурацією інтерфейсу.

Початкові умови імітації задавалися для типової місії моніторингу тривалістю 10 хв із дискретом оновлення 1 с. У базовому стані приймалися такі значення: кількість одночасно активних візуальних шарів $N_v = 4$, кількість попереджень $N_a = 2$, коефіцієнт досвіду оператора $E = 0,7$, початкова довіра до автономії $C_a = 0,8$, затримка каналу $\tau = 0,12$ с, базові втрати пакетів $P_{loss} = 0,02$, а нормовані початкові значення ситуаційної обізнаності та точності команд становили відповідно 0,72 і 0,78. Для статичного HMI коефіцієнт адаптації приймався сталим $A = 0,15$, тоді як для адаптивного HMI він змінювався в межах 0,55–0,80 залежно від $W(t)$ і $R(t)$.

Таблиця 1

Параметри імітаційного експерименту

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Щільність подій	N_e	5–30 подій/хв	сценарій зростаючого інформаційного навантаження
Втрати пакетів	P_{loss}	0–10 %	модель погіршення каналу зв'язку
Поріг довіри до автономії	θ_c	0,75	перехід у supervisory control
Нижній поріг автономії	θ_l	0,45	перехід у manual control
Ваги критерію J	w	0,30; 0,25; 0,20; 0,15; 0,10	SA, точність, навантаження, затримка, ризик

Методика експерименту полягала в параметричному порівнянні двох конфігурацій інтерфейсу – статичної та адаптивної – за однакових початкових умов. У першому сценарії змінювали щільність подій N_e від 5 до 30 подій/хв із кроком 5 за фіксованих $P_{loss} = 2\%$ і $C_a = 0,8$; у другому порівнювали режими manual, shared і supervisory за середнього інформаційного навантаження $N_e = 15$ подій/хв; у третьому збільшували втрати пакетів від 0 до 10 % із кроком 2 % при $N_e = 20$ подій/хв. Для кожної точки виконували 50 прогонів з випадковою варіацією вхідних параметрів у межах $\pm 5\%$, після чого обчислювали усереднені значення W , часу реакції та критерію J ; саме ці середні значення використано для побудови залежностей, відображених на рисунках 3–5.

Перший сценарій аналізує залежність модельованого показника NASA-TLX від щільності подій, які надходять оператору впродовж хвилини. Статичний НМІ в усіх випадках відображає однакову кількість елементів, тоді як адаптивний інтерфейс агрегує другорядні повідомлення та змінює режим візуалізації залежно від $W(t)$ і $R(t)$.

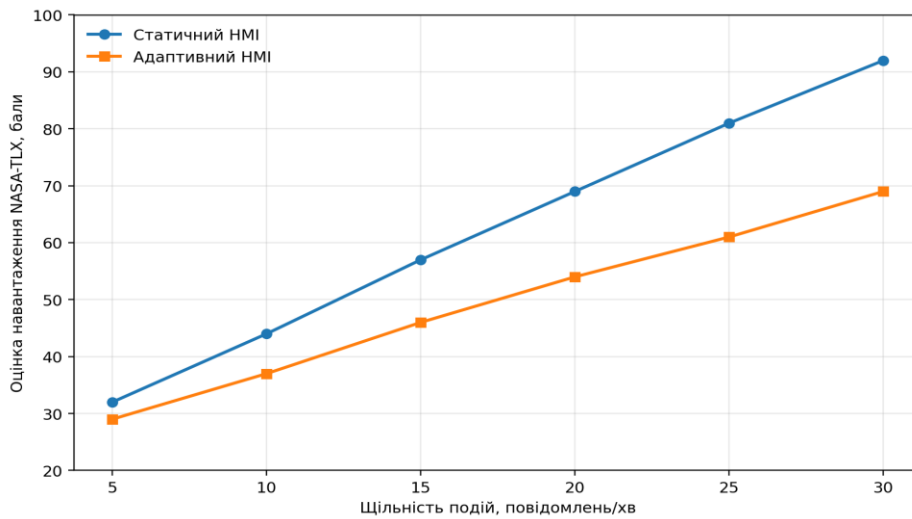


Рис. 3. Залежність оціненого когнітивного навантаження від щільності подій

Як видно з рисунка 3, у межах моделі адаптивний НМІ стабільно демонструє нижче навантаження; середнє зниження становить 19,3 %. Найбільш виражений ефект спостерігається за високої щільності подій, коли статичний інтерфейс перевищує зону прийняттого навантаження, а адаптивний залишається у межах, сумісних із supervisory control.

Другий сценарій відображає зміну часу реакції оператора для різних режимів взаємодії. Тут manual режим розглядається як базовий, а shared і supervisory режими – як наслідок передачі рутинних задач автопілоту та бортовій аналітиці.

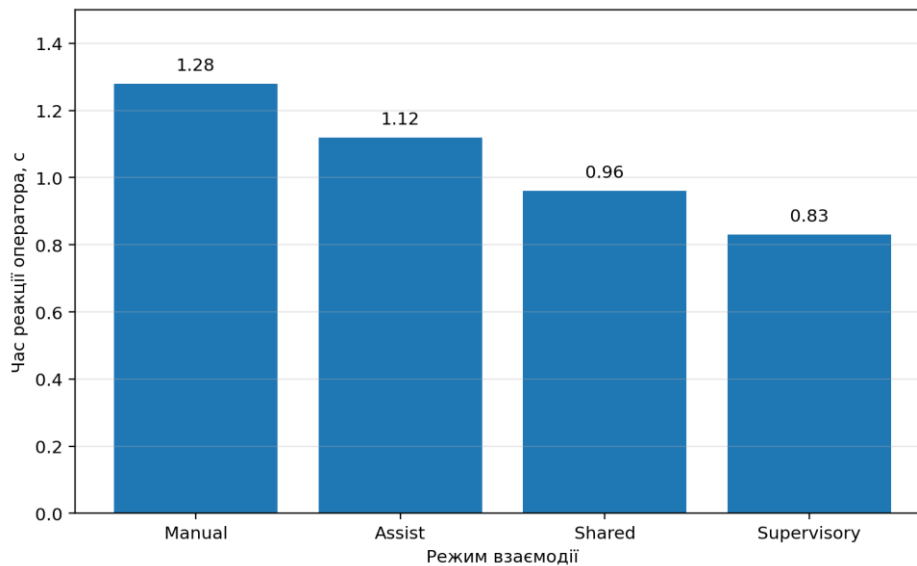


Рис. 4. Час реакції оператора залежно від режиму взаємодії

Модель показує, що перехід від повністю ручного керування до supervisory control зменшує час реакції приблизно на 35,2 %. Це не означає, що автономія завжди повинна бути максимальною; навпаки, її рівень має підлаштовуватися під контекст місії та якість каналу зв'язку. Однак результат підтверджує, що раціональний розподіл функцій між людиною і БПЛА дозволяє зменшити операційне навантаження на оператора.

Третій сценарій досліджує стійкість інтегрального критерію J до деградації каналу. У такому випадку адаптивний НМІ не лише змінює щільність відображуваної інформації, а й підвищує рівень пояснень, змінює пріоритетність попереджень та рекомендує перехід до більш керованого режиму взаємодії.

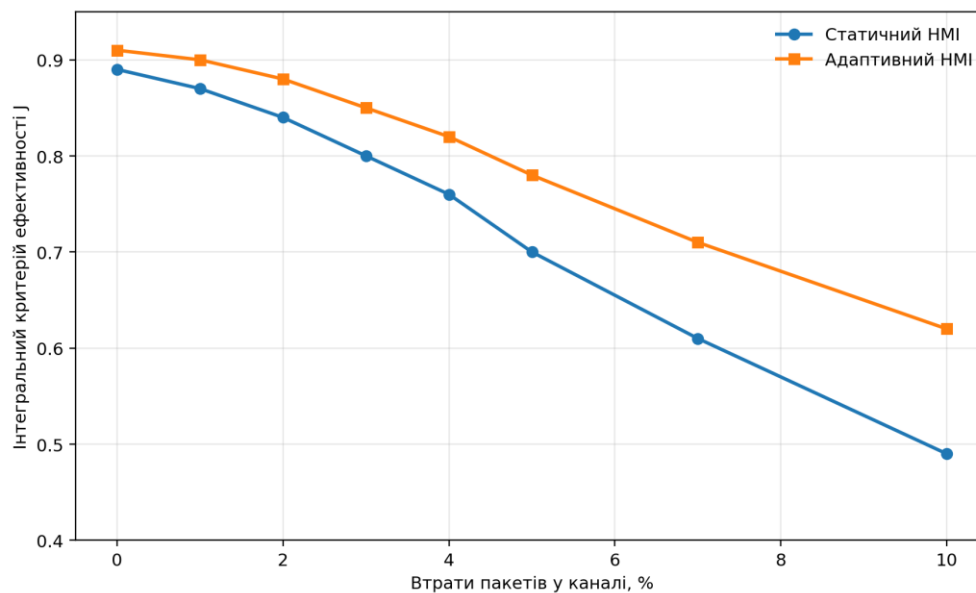


Рис. 5. Вплив втрат пакетів на інтегральний критерій ефективності НМІ

За умов 10 % втрат пакетів адаптивний інтерфейс зберігає значення критерію J на рівні 0,62 проти 0,49 для статичного НМІ, що відповідає відносному приросту ефективності близько 26,5 %. Отже, запропонований підхід є перспективним для задач, де неможливо гарантувати стабільний канал зв'язку або низьку щільність інцидентів.

Потрібно наголосити, що наведені графіки є результатом аналітичної імітації. Наступним етапом дослідження має стати стендова та натурна валідація: експерименти з реальними операторами, eye-tracking, опитувальником NASA-TLX, вимірюванням точності маневрування, часу перехоплення керування та надійності виконання задач місії.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі запропоновано концепцію інтелектуального НМІ для управління БПЛА, яка поєднує багатопшарову архітектуру інтерфейсу, модель оцінювання когнітивного навантаження, критерій інтегральної ефективності та правила адаптивного вибору режиму взаємодії. На відміну від традиційних статичних наземних станцій керування, запропонований підхід дозволяє розглядати НМІ як активний елемент системи підтримки рішень, що динамічно перебудовує структуру подання даних з урахуванням ризику, стану каналу та впевненості автономії.

Імітаційне оцінювання підтвердило доцільність адаптації інтерфейсу: при зростанні щільності подій зменшується прогнозоване когнітивне навантаження, скорочується час реакції оператора у supervisory-режимі та підвищується стійкість системи до втрат пакетів. Це створює передумови для практичного впровадження інтелектуальних НМІ у наземні станції керування БПЛА цивільного, інспекційного, пошуково-рятувального й оборонного призначення.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на: 1) експериментальну валідацію з участю операторів різного рівня підготовки; 2) інтеграцію eye-tracking, HRV та поведінкових індикаторів у контур оцінювання $W(t)$; 3) побудову модуля пояснюваної автономії для детектування та маршрутного планування; 4) розроблення цифрового двійника місії, у якому НМІ адаптується до сценарію в реальному часі; 5) дослідження групового управління кількома БПЛА в межах єдиної НМІ-платформи.

References:

1. Zhang, W., Feltner, D., Shirley, J. et al. (2016), «Unmanned Aerial Vehicle Control Interface Design and Cognitive Workload: A Constrained Review and Research Framework», *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Budapest, Hungary, 9–12 October, doi: 10.1109/SMC.2016.7844502.
2. Chew, J.Y., Kawamoto, M., Okuma, T. et al. (2021), «Adaptive attention-based human machine interface system for teleoperation of industrial vehicle», *Scientific Reports*, Vol. 11, doi: 10.1038/s41598-021-96682-0.
3. Rebensky, S., Carmody, K., Ficke, C. et al. (2022), «Teammates Instead of Tools: The Impacts of Level of Autonomy on Mission Performance and Human-Agent Teaming Dynamics in Multi-Agent Distributed Teams», *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 9, doi: 10.3389/frobt.2022.782134.

4. Xue, H., Zhang, Q. and Zhang, X. (2022), «Research on the Applicability of Touchscreens in Manned/Unmanned Aerial Vehicle Cooperative Missions», *Sensors*, Vol. 22 (21), doi: 10.3390/s22218435.
5. Hussein, A., Ghignone, L., Nguyen, T. et al. (2022), «Characterization of Indicators for Adaptive Human-Swarm Teaming», *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 9, doi: 10.3389/frobt.2022.745958.
6. Stevens, C.A., Morris, M.B., Fisher, C.R. and Myers, C.W. (2023), «Profiling cognitive workload in an unmanned vehicle control task with cognitive models and physiological metrics», *Military Psychology*, Vol. 35 (6), doi: 10.1080/08995605.2022.2130673.
7. van de Merwe, K., Mallam, S. and Nazir, S. (2024), «Agent Transparency, Situation Awareness, Mental Workload, and Operator Performance: A Systematic Literature Review», *Human Factors*, Vol. 66 (1), doi: 10.1177/00187208221077804.
8. Rea, D.J. and Seo, S.H. (2022), «Still Not Solved: A Call for Renewed Focus on User-Centered Teleoperation Interfaces», *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 9, doi: 10.3389/frobt.2022.704225.
9. Wang, J., Fang, W., Qiu, H. and Wang, Y. (2025), «The Impact of Automation Failure on Unmanned Aircraft System Operators' Performance, Workload, and Trust in Automation», *Drones*, Vol. 9 (3), doi: 10.3390/drones9030165.
10. Grabowski, M.R., Morgan, G., McGarvey, J. et al. (2025), «Human Machine Autonomy in Medical and Humanitarian Logistics in Remote and Infrastructure-Poor Settings», *Drones*, Vol. 9 (12), doi: 10.3390/drones9120841.
11. Li, Q., Molloy, O., El-Fiqi, H. and Eves, G. (2025), «Applications of Machine Learning in Assessing Cognitive Load of Uncrewed Aerial System Operators and in Enhancing Training: A Systematic Review», *Drones*, Vol. 9 (11), doi: 10.3390/drones9110760.

Пуховський Євген Степанович – доктор технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7843-0922>.

Наукові інтереси:

- автоматизація;
- машино- та приладобудування.

Ткачук Даниїла Юрїївна – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0003-2583-6445>.

Наукові інтереси:

- комп'ютерний зір;
- програмування;
- нейронні мережі.

Добржанський Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4330-0287>.

Наукові інтереси:

- автоматизація;
- приладобудування;
- програмування.

Барабаш Владислав Віталійович – студент Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- автоматизація;
- приладобудування.

Pukhovskiy E.S., Tkachuk D.Yu., Dobrzanskiy O.O., Barabash V.V.

Intelligent HMI for UAV control: architecture, adaptive transparency and simulation-based evaluation

The paper proposes a concept of an intelligent Human-Machine Interface (HMI) for unmanned aerial vehicle control in manual, shared, and supervisory modes. The approach is motivated by the rapid growth of telemetry, video, AI-generated alerts, and mission-context data that can overload the operator. A multilayer HMI architecture is developed, including a flight-safety layer, semantic visualization layer, operator workload and risk estimation module, autonomy transparency block, and interaction mode manager. An analytical criterion of HMI effectiveness is introduced to combine situation awareness, command accuracy, workload, latency, and operational risk. The paper also formalizes a workload model, a risk model, and switching rules between interaction modes. A simulation-based evaluation was carried out in Python; therefore, the presented charts describe predictive dependencies rather than field-flight results. The simulated adaptive HMI reduced the estimated workload by 19,3 % on average, lowered the operator reaction time to 0,83 s in the supervisory mode, and preserved a higher integral effectiveness under packet losses, with a relative gain of up to 26,5 % compared with a static interface. The proposed results may be used in designing ground control stations, mission-planning interfaces, and operator-support tools for civil, inspection, search-and-rescue, and safety-critical UAV applications.

Keywords: HMI; UAV; adaptive interface; situation awareness; cognitive workload; autonomy transparency; telemetry; supervisory control.

Стаття надійшла до редакції 23.12.2025.