



DOI 10.28925/2663-4023.2026.32.1148

УДК 004.51

Бушма Олександр Володимирович

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних наук,
Київський столичний університет ім. Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID: 0000-0003-1604-6129
o.bushma@kubg.edu.ua

Губський Олексій Миколайович

молодший науковий співробітник
відділу «Інтелектуального керування»,
Інститут Інформаційних технологій та систем НАН України, Київ, Україна
ORCID: 0009-0004-3106-2770
gubish@gmail.com

ОЦІНКА ВПЛИВУ ВІЗУАЛЬНОГО ІНТЕРФЕЙСУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІДДАЛЕНОГО КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Анотація. Робота присвячена розробленню інтегральної моделі оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів, що функціонують у високодинамічних середовищах із підвищеними вимогами до надійності операторської діяльності. Запропонований підхід спрямований на подолання розриву між якісними ергономічними характеристиками та їх кількісним відображенням у межах єдиної метрики. Модель базується на багаторівневій структурі критеріїв, де концептуальні властивості інтерфейсу трансформуються в операційні параметри, а далі – у дискретні експертні оцінки. Агрегування часткових показників здійснюється шляхом зваженої математичної обробки з формуванням загального чисельного інтегрального індексу. Особливістю моделі полягає в одночасному застосуванні прямого та інверсійного нормування параметрів на рівні підкритеріїв. Інверсійне нормування застосовано для дестимулюючих параметрів (складність, когнітивне навантаження, кількість маніпуляцій, потреба в інструкторі тощо), що забезпечує єдину спрямованість впливу всіх підкритеріїв моделі.

Систему визначення рівнів якості інтерфейсів на нижньому рівні ієрархії критеріїв сформовано за результатами експертного оцінювання. Такий підхід створює передумови для стандартизації процедури оцінювання та мінімізації суб'єктивних похибок. Модель орієнтована на застосування у процесах проектування, аудиту та сертифікації людино-машинних інтерфейсів складних технічних систем, а також може бути інтегрована в програмні комплекси підтримки прийняття рішень. Перспективи подальших досліджень пов'язані з адаптацією моделі до галузевої специфіки та емпіричною перевіркою кореляції інтегрального індексу оцінки якості інтерфейсів з реальними показниками ефективності операторської діяльності.

Ключові слова: людино-машинний інтерфейс; інтегральний показник якості; ієрархічна модель; багатокритеріальний аналіз; формалізація характеристик; ергономічне оцінювання; експертне оцінювання.

ВСТУП

Підвищення складності систем віддаленого керування динамічними об'єктами, таких як безпілотні літальні апарати, роботизовані маніпулятори та автономні транспортні засоби, супроводжується зростаючою кількістю інформаційних каналів і візуальних даних, що надходять до людини-оператора. Водночас психофізіологічні можливості оператора щодо сприйняття, обробки та реагування на ці дані залишаються обмеженими. Це породжує суттєве протиріччя між вимогами до інформаційної



складності інтерфейсу та здатністю людини підтримувати високу продуктивність і ситуаційну обізнаність під час критичних завдань керування [1].

У сучасних наукових підходах людино-машинні інтерфейси (ЛМІ) розглядаються не лише як технічний засіб відображення даних, але й як динамічний елемент системи, що формує когнітивне навантаження та визначає ефективність діяльності оператора. Без формалізованих критеріїв оцінки та математично обґрунтованих методів моделювання впливу візуального інтерфейсу на операторську поведінку неможливо об'єктивно визначити рівень ефективності таких інтерфейсів у реальних умовах експлуатації [2], [3].

Емпіричні дослідження показують, що складні моделі розподілення уваги та великі масиви візуальної інформації можуть призводити до зростання когнітивного навантаження, зниження ситуаційної обізнаності та погіршення показників контролю, особливо у багатокамерних системах керування із високою динамікою подій. Об'єкти такого типу вимагають швидкого переключення уваги між різними зонами відображення, що, у свою чергу, значно підвищує візуальну когнітивну складність і збільшує ризик помилок оператора [4].

Інші дослідження наголошують на ключовій ролі дизайну відображення інформації й відповідних візуальних шаблонів, що забезпечують ефективну обробку даних користувачем та узгоджуються з його ментальними моделями. Адекватна організація просторових і графічних елементів інтерфейсу сприяє не лише кращому сприйняттю, але й покращеній взаємодії між оператором і системою, зниженню навантаження та підвищенню оперативної продуктивності [5].

Дослідження підкреслюють нагальну необхідність розробки науково-методичного інструментарію для ідентифікації та класифікації ключових чинників впливу візуального інтерфейсу на діяльність людини-оператора. Такий інструментарій дозволить сформувати адаптивні критерії оцінки ефективності ЛМІ, автоматизувати процеси їх тестування та оптимізації, а також удосконалити програми підготовки операторів високодинамічних систем керування. Однак, попри активний розвиток галузевих технологій, відсутні універсальні формалізовані рішення з визначеним алгоритмом. Це унеможливає об'єктивну оцінку ефективності взаємодії в системі «людина-машина» на основі інтегральних показників і зумовлює необхідність пошуку об'єктивних критеріїв та аналітичних засобів для рішення такої задачі.

Метою роботи є розробка формалізованої параметричної моделі для оцінки впливу візуального ЛМІ на ефективність віддаленого керування динамічними об'єктами.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Параметрична модель оцінки впливу візуального ЛМІ на ефективність віддаленого керування об'єктами зумовлює потребу у чіткому визначенні теоретичного та методологічного базису. Необхідно визначити релевантні параметри, які відображають як властивості самого інтерфейсу, так і особливості взаємодії оператора з візуальним середовищем у процесі керування. Зрозуміло, що без формалізованого параметричного опису візуального ЛМІ оцінка його ефективності залишається фрагментарною та значною мірою суб'єктивною, оскільки ґрунтується переважно на експертних судженнях або окремих ергономічних показниках [6].

Методологічним підґрунтям такої моделі повинна бути узагальнена функціонально орієнтована класифікація інтерфейсів, які застосовуються в системах



керування, зокрема, в авіаційних, робототехнічних та безпілотних системах. Існуючі підходи до класифікації, як правило, базуються на функціональному призначенні інтерфейсу (інформаційні, керувальні, комбіновані), способах подання візуальної інформації (символьні, графічні, відеоорієнтовані), а також рівні інтеграції даних і ступені автоматизації взаємодії з оператором. Водночас такі класифікації не завжди враховують когнітивні аспекти діяльності оператора, зокрема розподіл уваги, швидкість прийняття рішень і здатність підтримувати ситуаційну обізнаність у динамічному середовищі [7].

Для оцінки параметрів візуальних інтерфейсів систем віддаленого керування важливо враховувати існуючий досвід організації та функціональних конфігурацій наземних станцій керування (НСК). Ґрунтовний огляд сучасних тенденцій у розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) демонструє, що архітектура НСК є однією з ключових складових, яка впливає на продуктивність оператора та ефективність виконання завдань. Це дозволяє систематизувати принципи організації робочого місця оператора, виділити базові елементи його взаємодії з системою, а також окреслити напрямки вдосконалення ЛМІ у контексті зростаючої інтеграції автономних та напівавтономних технічних засобів [8].

При побудові НСК відзначається прагнення до впровадження інноваційних рішень у дизайні ЛМІ, що забезпечують зниження когнітивного навантаження та покращення оперативної взаємодії оператора з динамічними об'єктами. Сучасні підходи включають використання змішаної реальності, інтеграцію голосових команд та потокового відео для підвищення ситуаційної обізнаності, що значною мірою трансформує класичні станції у більш адаптивні та інтуїтивні системи [9]. Одночасно окремі дослідження вказують на необхідність перегляду традиційних ЛМІ-рішень через призму їх здатності адаптуватися до різних контекстів застосування та різного рівня підготовки операторів, що підтверджує важливість універсальних дизайнерських підходів під час розробки інтерфейсів [10]. Досвід створення користувацьких інтерфейсів LED/LCD дисплейної консолі НСК підтверджує, що психофізіологічні чинники є важливими під час безпосередньої взаємодії оператора з інтерфейсом керування динамічними об'єктами. Ці чинники визначають межу стійкості оператора до стресових навантажень та швидкість його реакції в умовах невизначеності. Одночасно спостерігається вплив на поріг втомлюваності та ймовірність виникнення критичних помилок під час виконання місії [9].

Сучасні класифікації графічних інтерфейсів зазвичай розглядаються крізь призму кількох фундаментальних підходів. Одним із поширених підходів є класифікація інтерфейсів за стилем візуальної презентації (Visual Presentation Styles), яка включає скевоморфні, плоскі (Flat Design) та HUD-інтерфейси [11]. Скевоморфні рішення ґрунтуються на принципі впізнаваності форм та метафор аналогових приладів, що сприяє зниженню початкового когнітивного бар'єра для операторів із досвідом роботи з традиційними засобами індикації. Плоский дизайн, навпаки, орієнтований на функціональний мінімалізм і усунення візуальних артефактів (тіней, текстур), що дозволяє акцентувати увагу на критично важливих цифрових параметрах. HUD-інтерфейси реалізують концепцію інтегрованого візуального поля, у якому телеметрична інформація синтезується з реальним відеопотоком у єдиний інформаційний шар. Зазначена класифікація демонструє, що вибір стилю візуалізації безпосередньо визначає базові параметри ергономіки, зокрема швидкість зчитування інформації та рівень когнітивного навантаження оператора.



Іншим значущим напрямом є класифікація інтерфейсів за рівнем адаптивності (Interaction Adaptability Models), яка відображає динаміку людино-машинної взаємодії у статичних та контекстно-залежних системах [12]. Статичні системи характеризуються фіксованим розташуванням керуючих елементів та індикаторів, що сприяє формуванню стабільних моторних навичок оператора, однак призводить до надлишкового інформаційного навантаження у фазах низької інтенсивності місії. Адаптивні інтерфейси, навпаки, забезпечують динамічну модифікацію структури GUI залежно від поточного завдання або рівня критичності ситуації. Такий підхід до типологізації дозволяє врахувати механізми впливу інтерфейсу на когнітивне навантаження, розглядаючи адаптивність як інструмент активного управління увагою оператора. Окрему групу становлять підходи, що ґрунтуються на функціональній структурі інтерфейсів (Functional Complexity), у межах яких розрізняють інструментальні та місійно-орієнтовані рішення [13]. Фокус на пріоритетність операційних завдань, що виконуються оператором, дозволяє визначити цільову спрямованість інтерфейсу. Інструментальні інтерфейси зосереджені на процесах безпосереднього пілотування та контролю технічного стану об'єкта, де ключовими є точність телеметричних даних і мінімізація латентності реакції на відхилення параметрів. Місійно-орієнтовані інтерфейси, своєю чергою, реалізують концепцію стратегічного управління, у якій домінує картографічна інформація та ситуаційний контекст виконання завдання. Такий підхід дозволяє формалізувати оцінку функціональної повноти інтерфейсу, при якому зміщення фокусу з «керування приладами» на «виконання місії» забезпечує оптимізацію інструментального набору та підвищує операційну ефективність системи.

Розроблено людино-центровані класифікації інтерфейсів (User-Centered Classification), які ґрунтуються на врахуванні рівня кваліфікації користувача [14]. При такому підході акцент робиться на індивідуальних психофізіологічних характеристиках та професійному досвіді оператора, що дозволяє оцінити його готовність до взаємодії зі складними графічними середовищами. Ключовим показником виступає бар'єр входження, при якому для новачків пріоритетними є підказки та спрощені візуальні структури, тоді як для досвідчених операторів – використання розширених функціональних модулів із підвищеною інформаційною щільністю. Для параметричної моделі цей підхід може слугувати основою врахування потреби в навчанні. При цьому ефективність керування об'єктом розглядається як динамічний результат адаптації користувача до інтерфейсу, де складність візуального подання має бути узгоджена з рівнем професійної підготовки.

Аналіз свідчить, що існуючі класифікації, побудовані за ознаками формату подання інформації, рівня адаптивності або функціонального призначення інтерфейсів та переважно мають вузькоспеціалізований характер. Зіставлення таких підходів дозволяє дійти висновку, що кожен із них акцентує увагу на окремих аспектах функціонування однієї й тієї самої системи, не забезпечуючи її цілісного опису. Однак спільним для всіх класифікацій є те, що вони, як правило, фокусуються на людині-операторі. Тому когнітивне навантаження доцільно розглядати як базовий чинник, притаманний будь-якій моделі людино-машинної взаємодії, параметри якої зумовлюються ергономічними характеристиками візуального простору.

Також складовою людино-машинної системи є операційний блок, який забезпечує технічну реалізацію процесів керування та оброблення даних. В цьому напрямі доцільно виокремити складові, що визначають операційні можливості людино-машинного комплексу. До них належать рівень автоматизації, який інтерпретується як



ступінь автономності системи, а також обсяг доступного інструментарію, що характеризує функціональні можливості. Окрім цього, аналіз існуючих класифікацій підкреслює значущість форми подання інформації, що дозволяє розглядати тип інтерфейсу як окремий технічний параметр параметричної моделі. З огляду на залежність ефективності системи від рівня підготовки оператора, до моделі також доцільно інтегрувати критерій потреби в навчанні.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Систематизація існуючих підходів до класифікації інтерфейсів дає змогу перейти від фрагментарних описів до формалізованої параметричної моделі, яка дозволяє чисельно оцінити вплив візуального ЛМІ на ефективність віддаленого керування динамічними об'єктами. Складність формування інтегрального показника ефективності визначає доречність використання ієрархічної параметричної моделі, яка реалізує його декомпозицію на систему взаємопов'язаних рівнів параметрів, що в найкращій спосіб дозволяє формалізувати людино-машинні системи. Такий підхід є усталеним у теорії багатокритеріального прийняття рішень і забезпечує структурованість оцінювання, узгодженість параметрів та можливість агрегування різнорідних факторів в єдиний інтегральний індекс. Це забезпечує масштабованість моделі, можливість інтеграції експертних оцінок і експериментальних даних, а також формування адитивної функції ефективності, що є необхідним для кількісного порівняння альтернативних інтерфейсних рішень [15-17].

Запропонована модель структурована як ієрархічна система шести оцінювальних критеріїв, кожен з яких декомпозовано на підкритерії, що формують інтегральний індекс ефективності інтерфейсу. Фундаментальним критерієм моделі виступає ергономіка (E), яка відображає ступінь відповідності інтерфейсу фізіологічним і психофізіологічним характеристикам людини-оператора. Ергономічність визначає просторову організацію елементів керування та читабельність інформаційних повідомлень, що є критично важливим для мінімізації помилкових дій у процесі керування. З цим критерієм тісно пов'язане когнітивне навантаження (C), яке характеризує інтенсивність когнітивних процесів прийняття рішень та обсяг інформації, що потребує паралельної обробки. Високий рівень ергономічності інтерфейсу забезпечує оптимізацію когнітивного навантаження, зменшуючи втому оператора та підвищуючи стійкість його діяльності.

Операційні можливості людино-машинної системи формалізуються через ступінь автономності (A) та функціональну повноту (F). Перший з цих критеріїв визначає рівень автоматизації процесів керування – від ручного режиму до повністю автономних сценаріїв, тоді як другий відображає наявність і достатність інструментальних засобів для реалізації повного циклу операцій, включаючи планування, моніторинг і постопераційний аналіз. Специфіка взаємодії оператора з системою визначається типом інтерфейсу (I), який може варіюватися від традиційних пультових рішень до інноваційних середовищ доповненої реальності. Важливим критерієм є потреба в навчанні (L), що відображає складність засвоєння інтерфейсу та часові витрати, необхідні для досягнення оператором професійного рівня взаємодії з системою.

Критерії верхнього рівня є узагальненими латентними конструкціями, які не можуть бути безпосередньо виміряні експериментально. Тому декомпозиція цих критеріїв на підкритерії та кількісні показники є необхідною для переходу від



узагальнених концептів до вимірюваних параметрів та побудови інтегральної функції ефективності.

Аналіз ЛМІ як візуального середовища взаємодії дозволило виокремити метрики швидкості та точності виконання дій, які узагальнюються в межах критерію «Ергономіка (E)». Він характеризує якість візуальної комунікації, відповідність інтерфейсу психофізіологічним можливостям оператора та зручність його експлуатації. Для формалізації цього критерію запропоновано декомпозицію на підкритерії: візуальна ієрархія (E_{vh}), що забезпечує структуроване представлення інформації; інтуїтивність (E_{int}), яка визначає швидкість засвоєння логіки інтерфейсу; кількість кліків (E_{cl}) та час до виконання дії (E_{tm}) як показники операційної швидкості; а також наявність та якість зворотного зв'язку (E_{fb}), що забезпечує підтвердження результатів дій оператора. Ці підкритерії охоплюють повний цикл взаємодії «сприйняття–рішення–дія–реакція системи» та відповідають класичним підходам ергономіки та когнітивної інженерії, де ефективність інтерфейсу визначається через поєднання показників сприйняття, моторної активності та когнітивної обробки інформації. Така декомпозиція створює основу для подальшої кількісної оцінки ергономічної якості ЛМІ у складі ієрархічної параметричної моделі [18, 19].

Дослідження психофізіологічних аспектів віддаленого керування засвідчило, що психологічна напруга оператора формується на перетині суб'єктивного сприйняття складності завдань та їх об'єктивної операційної структури. На основі аналізу чинників втоми та перевантаження було сформовано декомпозицію критерію «Когнітивне навантаження (C)», яка включає: суб'єктивне навантаження (C_{ld}) для врахування індивідуального сприйняття складності та напруженості діяльності; кількість одночасних задач (C_{mt}) як показник щільності інформаційних потоків, що потребують паралельної когнітивної обробки; а також рівень автоматизації рутинних операцій (C_{ar}), який розглядається як ключовий механізм зниження перевантаження та підтримання ситуаційної обізнаності.

Запропонований набір підкритеріїв охоплює як об'єктивні параметри системної складності, так і суб'єктивні реакції людського фактору, що відповідає сучасним концепціям когнітивної інженерії та теорії когнітивного навантаження. Така декомпозиція забезпечує можливість формування кількісної оцінки когнітивної складності взаємодії та її інтеграції в ієрархічну параметричну модель ефективності ЛМІ [20, 21].

Аналіз взаємодії в контурі «людина–машина» показав, що автономність системи керування не є монолітним показником, а формується як результат розподілу функцій між оператором та технічним контуром управління. У моделі «Ступінь автономності (A)» визначається через зіставлення технологічних можливостей об'єкта та ролі людини в циклі прийняття рішень. Декомпозиція здійснена за трьома ключовими підкритеріями: рівень автоматизації (A_{al}), що характеризує здатність системи самостійно виконувати функції контролю та керування; кількість ручних дій (A_{mn}), який відображає інтенсивність прямого втручання оператора в процес керування; та наявність автопілоту (A_{ap}), що визначає можливість переходу об'єкта в режим автоматичного утримання параметрів руху. Запропонований набір підкритеріїв є достатнім для формального опису автономності, оскільки охоплює як програмну незалежність системи, так і фактичне навантаження на оператора в контурі керування [22-25].

Оцінка операційних можливостей ЛМІ здійснювалася через аналіз спектра завдань місії, що дозволило виокремити критерій «Функціональна повнота (F)» як



інтегральний показник інструментальної спроможності системи. Він інтегрує три ключових підкритерії: інтеграцією функцій (F_{in}), що відображає здатність інтерфейсу забезпечувати централізоване керування різнорідними підсистемами; зовнішніми засобами (F_{ex}), які характеризують можливість взаємодії з додатковими пристроями, сенсорами та інформаційними базами; та автоматичними діями (F_{au}), сфокусованими на підтримці комплексних сценаріїв управління та макрокоманд для спрощення виконання цільових операцій. Запропонована декомпозиція реалізує системно-інженерний підхід до формалізації інструментальної спроможності ЛМІ та є достатньою для опису функціональної повноти, оскільки вона охоплює як внутрішні можливості системи керування, так й інтеграцію у ширший інформаційно-технологічний контур виконання місії [19, 26-28].

Порівняльний аналіз архітектурних рішень показав, що технічна реалізація ЛМІ визначає функціональні межі його застосування, масштабованість та адаптивність до умов експлуатації. У межах цього було сформовано критерій «Тип інтерфейсу (I)», який відображає архітектурно-технологічні характеристики взаємодії людини з системою. Він узагальнює тип GUI (I_{ty}), що описує використану візуальну мову та парадигму подання інформації; кількість каналів введення (I_{in}), яка характеризує технічні засоби комунікації з оператором та мультимодальність цієї взаємодії; а також мобільність (I_{mb}), що відображає експлуатаційну гнучкість інтерфейсу щодо платформи, середовища та контексту використання. Результат інтеграції таких підкритеріїв формує відповідний архітектурний рівень моделі оцінювання ЛМІ, оскільки визначає фізичні та програмні межі взаємодії складових системи, визначає усі її когнітивні та операційні характеристики та є достатнім для формалізації типу інтерфейсу [19, 22, 26, 29, 30].

Аналіз часових і ресурсних витрат на підготовку оператора засвідчив, що складність опанування ЛМІ є критичним фактором його практичної придатності та економічної ефективності впровадження. У межах цього було сформовано критерій «Потреба в навчанні (L)», який відображає особливості процесу опанування інтерфейсу та вимоги до підготовки персоналу. Його декомпозиція реалізована як три підкритерії: час навчання (L_{tm}) як кількісну міру тривалості досягнення операційної компетентності; необхідність інструктора (L_{tr}), що відповідає показнику автономності навчального процесу та рівню підтримки; а також складність інтерфейсу (L_{cx}), пов'язаною зі структурно-когнітивними труднощами засвоєння логіки взаємодії оператора з системою.

У результаті критерій потреби в навчанні відображає не лише людський фактор, але й організаційно-економічні аспекти впровадження інтерфейсу. Це дозволяє інтегрувати його до системної моделі оцінювання ефективності ЛМІ завдяки достатньому набору підкритеріїв, що створює підґрунтя для прогнозування організаційних, часових та фінансових витрат на інтеграцію відповідного інтерфейсу в практику експлуатації [19, 26, 31-33].

На третьому рівні ієрархії використовується дискретна порядкова шкала бальної оцінки, яка забезпечує ранжування ступеня прояву кожного підкритерію в інтервалі від 1 до 3. Така тривірнева шкала відображає якісно відмінні стани взаємодії оператора з системою та відповідає мінімально достатній градації для формування агрегованих інтегральних показників. Порядкова природа шкали передбачає збереження відносного порядку значень без інтерпретації числових різниць як метричних відстаней, що відповідає концепції латентних конструкцій та їх експертного вимірювання. Третій рівень моделі виконує функцію кількісного шару, який забезпечує формалізацію



якісних характеристик інтерфейсу та створює основу для подальшого агрегування підкритеріїв у критерії верхнього рівня та формування інтегральної функції ефективності.

На підставі агрегованих значень розглянутих вище підкритеріїв моделі було виокремлено три узагальнені рівні якості інтерфейсів (R_1 , R_2 та R_3), які відображають градацію якості взаємодії в контурі «людина–машина».

Рівень R_1 (оптимальний) відповідає максимальному рівню прояву підкритеріїв та охоплює інтерфейси, що демонструють високий рівень ергономічної відповідності, мінімізоване когнітивне навантаження та розвинену функціональну повноту. Для таких систем характерні високий ступінь автономності, структурована візуальна ієрархія даних та інтуїтивно зрозуміла архітектура взаємодії. Інтерфейси цього рівня забезпечують максимальну ситуаційну обізнаність оператора, стійкість до помилок та надійність управління навіть у критичних режимах функціонування динамічних об'єктів.

Рівень R_2 (задовільний) стосується середнього рівня прояву підкритеріїв та відповідає інтерфейсам з помірними показниками системної ефективності, які забезпечують виконання повного функціонального циклу завдань, однак супроводжуються підвищеним когнітивним навантаженням або потребують більш тривалого періоду навчання оператора. Для цього рівня характерна наявність окремих ергономічних або архітектурних обмежень, що за умов тривалої експлуатації можуть спричинити накопичення втоми, зниження швидкості прийняття рішень та деградацію операційної ефективності.

Рівень R_3 (критичний) відповідає мінімальному рівню прояву підкритеріїв та об'єднує інтерфейси з низьким рівнем ергономічної відповідності, надмірним когнітивним навантаженням або обмеженою функціональною спроможністю. Недосконалість технічної реалізації, неадекватний тип інтерфейсу або невідповідність психофізіологічним можливостям оператора формують підвищені ризики операторських помилок та втрати керованості системи. Ці інтерфейси потребують суттєвого доопрацювання, оскільки вони не забезпечують необхідний рівень безпеки та надійності керування в складних умовах експлуатації.

Вибір трирівневої порядкової шкали зумовлений методологічними та когнітивними чинниками. По-перше, дискретні експертні шкали широко застосовуються в багатокритеріальних моделях ієрархічного типу для ранжування латентних конструктів. По-друге, обмеження кількості рівнів дозволяє досягти компромісу між чутливістю оцінювання та стабільністю експертних суджень, зменшуючи випадкову дисперсію. По-третє, з позицій когнітивної теорії, зменшення кількості категорій відповідає принципу когнітивної економії та знижує навантаження на експертів при формуванні оцінок [20, 34-37].

Числові значення параметрів третього рівня ієрархії були отримані шляхом залучення експертних суджень із використанням методу парних порівнянь у межах аналітичного ієрархічного процесу (Analytic Hierarchy Process, АНП). Такий підхід дозволяє формалізувати суб'єктивні професійні уявлення експертів щодо відносної важливості ергономічних, когнітивних та функціональних чинників і трансформувати їх у вагові коефіцієнти та числові порогові значення класів інтерфейсів [34].

Метод АНП забезпечує декомпозицію задачі оцінювання на ієрархічну структуру критеріїв, підкритеріїв та дискретних рівнів оцінки, що узгоджується з запропонованою параметричною моделлю. Використання парних порівнянь дозволяє мінімізувати когнітивну складність процедури експертного оцінювання, оскільки експерти



здійснюють відносні судження між параметрами, а не визначають абсолютне числове значення відносно запропонованої шкали. Для підвищення надійності оцінювання застосовано ітераційну процедуру опитування з контролем узгодженості, що дозволяє ідентифікувати суперечливі судження та досягти конвергенції експертних оцінок. Досягнення прийнятого рівня узгодженості забезпечує відтворюваність результатів і дозволяє використовувати отримані ваги як інваріантні параметри алгоритму автоматизованої оцінки інтерфейсів.

Основною метою експертного опитування було визначення кількісних меж переходу між трьома рівнями якості інтерфейсів, що дозволило формалізувати дискретну порядкову шкалу третього рівня ієрархії. Таким чином було забезпечено перехід від якісних латентних характеристик до числових параметрів та їх інтеграції в агрегований індекс ефективності.

У межах опитування експерти оцінювали кожен підкритерій за трибальною порядковою шкалою, де значення 3 відповідало оптимальному рівню реалізації параметра, який забезпечує мінімальне когнітивне навантаження та високу ергономічну відповідність, значення 2 – задовільному рівню, що допускає ефективне виконання завдань за підвищених вимог до уваги оператора, а значення 1 – критичному рівню, при якому потенційно обмежується безпека та надійність керування. Використання дискретної порядкової шкали узгоджується з латентною природою критеріїв верхнього рівня та мінімізує ризик спотворення оцінки, характерний для надмірно деталізованих шкал у разі експертного оцінювання складних соціотехнічних систем. Додатково враховано узгодженість експертних суджень, що сприяє підвищенню рівня валідності отриманих вагових коефіцієнтів та порогових значень чисельної оцінки.

Отримані експертні параметри використовуються для формування інтегральної функції оцінювання, що забезпечує можливість порівняльного аналізу альтернативних інтерфейсних рішень у межах єдиної параметричної моделі. Структурно функція базується на ієрархічній декомпозиції критеріїв верхнього рівня на підкритерії та дискретні порядкові оцінки третього рівня, що дозволяє поєднати латентні конструкції з вимірюваними показниками [34].

Запропонована трирівнева ієрархічна архітектура моделі відображає логіку переходу від концептуальних доменів (ергономіка, когнітивне навантаження, автономність, функціональна повнота, тип інтерфейсу та потреба в навчанні) до операційних параметрів та дискретних експертних оцінок. Такий підхід відповідає класичній парадигмі багатокритеріального аналізу, де верхній рівень репрезентує латентні системні властивості, середній рівень – їх структурні прояви, а нижній – формалізовані вимірювальні шкали. Два верхні концептуальні рівні ієрархічної структури формування інтегральної функції оцінювання інтерфейсних рішень наведено на рис. 1. Рівень експертних оцінок не включено до схеми, оскільки він виконує роль операційного механізму квантифікації підкритеріїв, а не самостійної концептуальної сутності. Третій рівень має процедурний характер і є вкладеним у підкритерії, що методологічно виправдовує його відсутність у концептуальній ієрархічній схемі.



Рис. 1. Концептуальна ієрархічна структура формування інтегральної функції оцінювання інтерфейсних рішень

ФОРМАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ОЦІНКИ

Сформована ієрархічна структура критеріїв і підкритеріїв створює підґрунтя для побудови формальної параметричної моделі інтегральної оцінки якості візуального людино-машинного інтерфейсу. З огляду на багатовимірний характер досліджуваного об'єкта, оцінювання ефективності інтерфейсних рішень потребує агрегування різномірних показників, що відображають ергономічні, когнітивні, технічні та навчальні аспекти взаємодії оператора з системою.

У межах запропонованого підходу кожен критерій верхнього рівня репрезентує латентну системну властивість, яка не підлягає безпосередньому вимірюванню. Натомість підкритерії виступають як операційні змінні, що фіксують структурні прояви відповідних властивостей у вимірюваному середовищі. На третьому рівні ієрархії підкритерії набувають кількісної форми через дискретні порядкові експертні оцінки, які відображають ступінь відповідності інтерфейсу заданим вимогам.

Для переходу від локальних оцінок до інтегрального показника якості використовується адитивна модель агрегування, яка є класичним інструментом багатокритеріального аналізу. Такий підхід ґрунтується на припущенні про відносну незалежність критеріїв верхнього рівня та можливість лінійного згортання їх внесків із урахуванням вагових коефіцієнтів. Ваги критеріїв і підкритеріїв визначаються експертним шляхом із використанням методу парних порівнянь у межах аналітичного ієрархічного процесу, що дозволяє відобразити відносну значущість окремих чинників у структурі інтегрального показника.

З формальної точки зору інтегральна оцінка якості інтерфейсу розглядається як зважена сума значень підкритеріїв, згрупованих за відповідними доменами верхнього рівня. Така подвійна адитивна структура (за критеріями та підкритеріями) забезпечує прозору інтерпретацію внеску кожного чинника, а також дозволяє виконувати необхідний аналіз моделі щодо зміни вагових коефіцієнтів або експертних оцінок.

При запропонованому підході інтегральний показник S ефективності людино-машинного інтерфейсу може бути отриманий як



$$S = \sum_{i=1}^6 W_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{m_i} \omega_{ij} \cdot p_{ij} \right) =$$
$$= W_E \cdot (\omega_{Evh} \cdot p_{Evh} + \omega_{Eint} \cdot p_{Eint} + \omega_{Ecl} \cdot p_{Ecl} + \omega_{Efb} \cdot p_{Efb} + \omega_{Etm} \cdot p_{Etm}) + W_C \cdot$$
$$(\omega_{Cld} \cdot p_{Cld} + \omega_{Cmt} \cdot p_{Cmt} + \omega_{Car} \cdot p_{Car}) + W_A \cdot (\omega_{Aal} \cdot p_{Aal} + \omega_{Amn} \cdot p_{Amn} + \omega_{Aap} \cdot$$
$$p_{Aap}) + W_F \cdot (\omega_{Fin} \cdot p_{Fin} + \omega_{Fex} \cdot p_{Fex} + \omega_{Fau} \cdot p_{Fau}) + W_I \cdot (\omega_{Ity} \cdot p_{Ity} + \omega_{Iin} \cdot p_{Iin} +$$
$$\omega_{Imb} \cdot p_{Imb}) + W_L \cdot (\omega_{Ltm} \cdot p_{Ltm} + \omega_{Ltr} \cdot p_{Ltr} + \omega_{Lcx} \cdot p_{Lcx}),$$

де $W_E, W_C, W_A, W_F, W_I, W_L$ – вагові коефіцієнти критеріїв «Ступінь автономності», «Когнітивне навантаження», «Ергономіка», «Функціональна повнота», «Тип інтерфейсу», «Потреба в навчанні», відповідно;

$\omega_{Aal}, \omega_{Amn}, \omega_{Aap}$ – локальні ваги підкритеріїв критерію «Ступінь автономності»: «Рівень автоматизації», «Кількість ручних дій», «Наявність автопілота», відповідно;

$p_{Aal}, p_{Amn}, p_{Aap}$ – значення підкритеріїв критерію «Ступінь автономності»: «Рівень автоматизації», «Кількість ручних дій» та «Наявність автопілота», відповідно;

$\omega_{Cld}, \omega_{Cmt}, \omega_{Car}$ – локальні ваги підкритеріїв критерію «Когнітивне навантаження»: «Суб'єктивне навантаження», «Кількість одночасних задач», «Автоматизація рутини», відповідно;

$p_{Cld}, p_{Cmt}, p_{Car}$ – значення підкритеріїв критерію «Когнітивне навантаження»: «Суб'єктивне навантаження», «Кількість одночасних задач», «Автоматизація рутини», відповідно;

$\omega_{Evh}, \omega_{Eint}, \omega_{Ecl}, \omega_{Efb}, \omega_{Etm}$ – локальні ваги підкритеріїв критерію «Ергономіка»: «Візуальна ієрархія», «Інтуїтивність», «Кількість кліків», «Наявність фідбеку», «Час до дії», відповідно;

$p_{Evh}, p_{Ein}, p_{Ecl}, p_{Efb}, p_{Etm}$ – значення підкритеріїв критерію «Ергономіка»: «Візуальна ієрархія», «Інтуїтивність», «Кількість кліків», «Наявність фідбеку», «Час до дії», відповідно;

$\omega_{Fin}, \omega_{Fex}, \omega_{Fau}$ – локальні ваги підкритеріїв критерію «Функціональна повнота»: «Інтеграція функцій», «Зовнішні засоби», «Автоматичні дії», відповідно;

$p_{Fin}, p_{Fex}, p_{Fau}$ – значення підкритеріїв критерію «Функціональна повнота»: «Інтеграція функцій», відповідно;

$\omega_{Ity}, \omega_{Iin}, \omega_{Imb}$ – локальні ваги підкритеріїв критерію «Тип інтерфейсу»: «Тип GUI», «Кількість каналів введення», «Мобільність», відповідно;

$p_{Ity}, p_{Iin}, p_{Imb}$ – значення підкритеріїв критерію «Тип інтерфейсу»: «Тип GUI», «Кількість каналів введення», «Мобільність», відповідно;

$\omega_{Ltm}, \omega_{Ltr}, \omega_{Lcx}$ – локальні ваги підкритеріїв критерію «Потреба в навчанні»: «Час навчання», «Необхідність інструктора», «Складність інтерфейсу», відповідно;

$p_{Ltm}, p_{Ltr}, p_{Lcx}$ – значення підкритеріїв критерію «Потреба в навчанні»: «Час навчання», «Необхідність інструктора», «Складність інтерфейсу», відповідно.

Отже, запропонований аналітичний вираз має дворівневу агреговану структуру, де внутрішня сума виконує функцію синтезу підкритеріїв у межах окремого критерію, тоді як зовнішня сума забезпечує інтеграцію всіх критеріїв у єдиний узагальнений показник якості інтерфейсу. Така декомпозиція дозволяє гнучко налаштовувати модель шляхом варіації вагових коефіцієнтів, що, відображає специфіку експлуатації обладнання контексту та пріоритети системи. Наприклад, в умовах критичних або високоризикових місій ваговий коефіцієнт критерію когнітивного навантаження W_C



може бути підвищений, що робить його домінантним чинником у інтегральній оцінці інтерфейсного рішення.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ

На основі описаної процедури експертного оцінювання були отримані кількісні параметри для кожного підкритерію, які формують операційний рівень ієрархічної моделі. Для цього були залучені інструктори з підготовки пілотів та фахівці з авіаційної ергономіки. Результати експертних суджень структуровано у вигляді таблиці, що відображають узгоджені значення порядкових оцінок, порогові межі переходу між рівнями якості та відповідні вагові коефіцієнти.

Подані в табл. 1 результати репрезентують формалізований емпіричний базис параметричної моделі та забезпечують можливість подальшого агрегування та інтеграції у загальний індекс якості інтерфейсу. Наведені результати експертного опитування виступають проміжною ланкою між концептуальною ієрархією критеріїв та формалізованою інтегральною функцією оцінювання, забезпечуючи емпіричну обґрунтованість запропонованої параметричної моделі. Це також дозволяє простежити варіативність експертних оцінок у межах окремих підкритеріїв і виявити та, при потребі, активізувати окремі домінантні фактори, що впливають на фінальну класифікацію інтерфейсних рішень.

Таблиця 1

Результати експертної оцінки рівнів якості інтерфейсів

Критерій	Підкритерій	Рівень якості інтерфейсу		
		R ₁	R ₂	R ₃
Ергономіка (E)	Візуальна ієрархія (E _{vh})	3	2	1
	Інтуїтивність (E _{int})	3	2	1
	Кількість кліків (E _{cl})	3	2	1
	Наявність фідбеку (E _{fb})	3	2	1
	Час до дії, сек (E _{tm})	3	2	1
Когнітивне навантаження (C)	Суб'єктивне навантаження (C _{ld})	1	2	3
	Кількість одночасних задач (C _{mt})	3	2	1
	Автоматизація рутини (C _{ar})	3	2	1
Ступінь автономності (A)	Рівень автоматизації (A _{al})	3	2	1
	Кількість ручних дій (A _{mn})	1	2	3
	Наявність автопілота (A _{ap})	3	2	1
Функціональна повнота (F)	Інтеграція функцій (F _{in})	3	2	1
	Зовнішні засоби (F _{ex})	1	2	3
	Автоматичні дії (F _{au})	3	2	1
Тип інтерфейсу (I)	Тип GUI (I _{ty})	3	2	1
	Кількість каналів введення (I _{in})	1	2	3
	Мобільність (I _{mb})	3	2	1
Потреба в навчанні (L)	Час навчання, год (L _{tm})	3	2	1
	Необхідність інструктора (L _{tr})	1	2	3
	Складність інтерфейсу (L _{cx})	1	2	3



Частина оцінювання підкритеріїв у межах запропонованої моделі здійснюється на основі експертної інтерпретації їх параметрів, які вимірюються кількісно.

Оцінювання підкритерію «Кількість кліків» E_{cl} здійснюється відповідно до ергономічного принципу мінімізації операційного шляху доступу до функції, оскільки збільшення кількості переходів прямо корелює зі зниженням ефективності взаємодії. Оцінка 3 присвоюється при значенні ≤ 2 кліків, оцінка 2 — у межах 3–5 кліків, тоді як значення > 5 відповідає оцінці 1 як індикатору низького рівня ергономічної оптимальності.

Для підкритерію «Час до дії» E_{tm} прийнято градацію: 3 – при тривалості < 3 с, 2 – у діапазоні 3–7 с, 1 – понад 7 с. Інтервал 3–7 с інтерпретується як емпірично визначений перехідний поріг, після якого реакція оператора втрачає миттєвий характер і класифікується як затримана (рівень якості R_2).

Підкритерій «Кількість одночасних задач» C_{mt} відображає когнітивне навантаження. Рівень якості R_1 відповідає фокусуванню на одній задачі (оцінка 3), тоді як перевищення трьох паралельних задач зумовлює присвоєння оцінки 1 та автоматичне віднесення інтерфейсу до критичного рівня якості R_3 .

Оцінювання підкритерію «Кількість каналів введення» I_{in} здійснюється за інверсною логікою, відповідно до якої якість зростає зі зменшенням кількості каналів. Понад два канали відповідають оцінці 1 як ознаці функціональної надлишковості; 1–2 канали – оцінці 2; один канал введення – оцінці 3 як показнику структурної визначеності та ергономічної цілісності.

Аналогічно, підкритерій «Час навчання» L_{tm} структурується за тривалістю: ≤ 1 год (оцінка 3), 1–4 год (оцінка 2), > 4 год (оцінка 1). Запропоновані пороги відображають перехід від швидкої адаптації до ситуації, коли навчання стає обмежувальним чинником ефективності експлуатації системи.

Для окремих підкритеріїв у моделі застосовано інверсну (зворотну) шкалу оцінювання, за якою зростання числового значення параметра відповідає зниженню рівня якості ЛМІ. У таких випадках градація здійснюється з метою збереження єдиної логіки інтерпретації інтегрального показника.

Такий підхід використано для підкритерію «Суб'єктивне навантаження» C_{ld} . В цьому випадку інверсна шкала виконує додаткову методологічну функцію: трансформує показник «когнітивного навантаження» у показник «когнітивного комфорту». Таким чином, висока оцінка відповідає мінімізації ментальних зусиль, необхідних для інтерпретації інформації та прийняття рішення, що безпосередньо підвищує ергономічний рівень системи.

Аналогічна логіка застосовується до підкритерію «Кількість ручних дій» A_{mn} , де інверсія шкали відображає ступінь автоматизації операцій. Збільшення кількості ручних маніпуляцій підвищує ймовірність помилки та подовжує час реакції, тоді як вищий рівень автоматизації, навпаки, сприяє стабільності та швидкодії взаємодії.

Для підкритерію «Зовнішні засоби» F_{ex} зворотна шкала характеризує автономність та інтегрованість інтерфейсу. Мінімізація потреби у зовнішніх діях, додаткових модулях або допоміжних процедурах підвищує системну цілісність і, відповідно, інтегральну оцінку якості.

Інверсний підхід використано також для підкритеріїв «Складність інтерфейсу» L_{cx} та «Необхідність залучення інструктора» L_{tr} , які у процесі освоєння розглядаються як індикатори надлишковості структури та недостатньої інтуїтивності. Відтак найпростіший для опанування інтерфейс, що не потребує додаткового навчального супроводу, отримує найвищий бал, тоді як зростання складності або залежності від



зовнішньої підтримки інструктора знижує рівень якості. Усі зазначені інверсії забезпечують єдину спрямованість інтегральної функції: зростання числового значення індексу відповідає підвищенню загального рівня якості ЛМІ.

За результатами комплексного експертного оцінювання було здійснено формалізацію рівнів якості інтерфейсних рішень та визначено граничні інтервали інтегрального показника S . Це дозволило трансформувати сукупність якісних характеристик ЛМІ у детерміновану тривірневу систему класифікації, що має чітке числове відображення та придатна до алгоритмічної реалізації. Встановлені порогові значення забезпечують однозначну інтерпретацію інтегрального індексу в координатах «оптимальний – задовільний – критичний» стан.

Рівень якості R_1 інтерпретується як оптимальний та відповідає діапазону $0,67 \leq S \leq 1,0$. Досягнення такого рівня передбачає переважання високих оцінок за більшістю підкритеріїв (усереднений бальний еквівалент 2,6-3,0), що відображає системну узгодженість компонентів інтерфейсу, мінімізоване когнітивне навантаження та забезпечення оперативного прийняття рішень оператором у реальному часі.

Рівень R_2 (задовільний) охоплює інтервал $0,34 \leq S \leq 0,66$ та відповідає середньому бальному діапазону 1,6-2,5. Такий стан характеризується наявністю окремих структурних або ергономічних недоліків, які підвищують ментальне напруження користувача, однак не призводять до системної втрати функціональної придатності інтерфейсу. В цьому випадку ефективність взаємодії зберігається, але її рівень знижений порівняно з оптимальним.

Рівень якості R_3 визначається як критичний та відповідає значенням $S \leq 0,33$, що корелює із середнім балом підкритеріїв нижче 1,6. Такі результати свідчать про суттєву ергономічну та когнітивну невідповідність інтерфейсу вимогам експлуатації. Математично це означає домінування дестимулюючих параметрів у структурі моделі, що підвищує ризик втрати ситуаційної обізнаності та знижує надійність системи в умовах підвищеної динаміки або інформаційного перевантаження.

Використання порогів, кратних одній третині шкали (1/3 та 2/3), забезпечує симетричність інтерпретації інтегрального показника та створює формальну основу для повної автоматизації процедури оцінювання в межах розробленої інформаційної технології. Така структура дозволяє реалізувати алгоритмічну класифікацію інтерфейсів без залучення додаткової експертної інтерпретації на фінальному етапі аналізу.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розроблено та обґрунтовано інтегральну модель оцінювання якості ЛМІ, яка базується на систематизованій сукупності ергономічних підкритеріїв та їх математичній агрегації в чисельний показник. Запропонований підхід забезпечує формалізацію суб'єктивних експертних суджень і трансформацію їх у кількісний результат. Методологічною особливістю моделі є використання інверсійних шкал для критеріїв із негативною семантикою, що дозволяє гармонізувати напрям впливу всіх складових та підвищити коректність інтегральної оцінки. Така уніфікація мінімізує методичні похибки та забезпечує логічну узгодженість системи показників. На основі експертного оцінювання встановлено граничні діапазони інтегрального індексу S та сформовано систему визначення якості інтерфейсів.

Сферою застосування моделі є проектування, експертиза, модернізація та сертифікація ЛМІ складних технічних систем, які використовують високодинамічні



середовища з високим рівнем відповідальності оператора за прийняті рішення: авіаційні, транспортні, енергетичні, оборонні, операторські та диспетчерські комплекси. Принципи застосування моделі визначаються її системно-інженерною природою та орієнтацією на практичну інтеграцію у процеси проектування й оцінювання ЛМІ. Ключовим є принцип комплексності, який передбачає одночасний аналіз ергономічних, когнітивних та функціональних аспектів інтерфейсу. Принцип уніфікації шкал забезпечує співставність різнорідних показників завдяки приведенню їх до єдиної логіки інтерпретації інтегрального індексу. Підхід порогової структурованості гарантує чітку класифікацію результатів за рівнями якості та усуває неоднозначність трактування. Результуюча технологічність моделі передбачає можливість автоматизованого розрахунку та її інтеграцію в програмні комплекси оцінювання, що розширює сферу прикладного використання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптацію моделі до специфіки окремих науково-технічних галузей, розширення системи критеріїв із урахуванням контексту використання та емпіричну перевірку кореляції інтегрального показника якості з реальними показниками ефективності операторської діяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yang, Y., Zhou, T., Zhu, Q., Vann, W., & Du, J. (2023). Brain functional connectivity under teleoperation latency: A fNIRS study. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2311.09062>
2. Shyshak, A. V., & Pupena, O. M. (2020). Lifecycle management of human-machine interfaces. Scientific Works of the National University of Food Technologies, 26(3), 17–27.
3. Riabovol, D. A. (2021). Analysis of visual information perception for designing additive cyber-design of human-machine interface for smart manufacturing. In Proceedings of the 25th International Youth Forum “Radio Electronics and Youth in the 21st Century” (Vol. 2, pp. 21–22).
4. Liu, H., et al. (2026). Operational performance, cognitive load, visual attention, and usability of fixed-, manual-, and autonomous-camera control in telemanipulation systems. Applied Ergonomics, 130, 104647. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104647>
5. Smalko, O. (2025). Evolution of digital interfaces. Bulletin of Kamianets-Podilskyi National Ivan Ohienko University. Physical and Mathematical Sciences, 18, 115–120.
6. Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2015). Engineering psychology and human performance (4th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315665177>
7. Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. Human Factors, 37(1), 32–64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>
8. Telli, K., Kraa, O., Himeur, Y., Ouamane, A., Boumehraz, M., Atalla, S., & Mansoor, W. (2023). A comprehensive review of UAV research trends. Systems, 11(8), 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>
9. Hubskeyi, O. M. (2024). Analysis of user interfaces for UAV ground control stations. Cybernetics and Computer Engineering, 2024(3), 5–21. <https://doi.org/10.15407/kvt217.03.005>
10. Anderson, C., Efav, A., Emery, E., Mueller, J., & Schreiner, J. (2017). Next generation universal ground control system HMI design. Industrial and Systems Engineering Review, 5(2).
11. Spiliotopoulos, K., Rigou, M., & Sirmakessis, S. (2018). Skeuomorphic vs flat design: UX comparison. Multimodal Technologies and Interaction, 2(2), 31. <https://doi.org/10.3390/mti2020031>
12. Miraz, M. H., Ali, M., & Excell, P. S. (2021). Adaptive user interfaces and usability. Computer Science Review, 40, 100363. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100363>
13. Brdник, S., Heričko, T., & Šumak, B. (2022). Intelligent user interfaces: A systematic mapping study. Sensors, 22(15), 5830. <https://doi.org/10.3390/s22155830>
14. Picardi, A., & Caruso, G. (2024). User-centered evaluation framework for AR interaction design. Multimodal Technologies and Interaction, 8(5), 41. <https://doi.org/10.3390/mti8050041>
15. Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). Decisions with multiple objectives: Preferences and value trade-offs. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084>
16. Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). Multiple criteria decision analysis: An integrated approach. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>



17. Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2013). *Systems engineering and analysis* (5th ed.). Pearson.
18. Nielsen, J. (1993). *Usability engineering*. Academic Press.
19. Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2013). *Engineering psychology and human performance* (4th ed.). Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781315665177>
20. Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>
21. Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159–177. <https://doi.org/10.1080/14639220210123806>
22. Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). Human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A*, 30(3), 286–297. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
23. Sheridan, T. B. (2002). *Humans and automation: System design and research issues*. Wiley.
24. Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. MIT Press.
25. Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem. *Human Factors*, 37(2), 381–394. <https://doi.org/10.1518/0018720957790645>
26. International Organization for Standardization. (2019). ISO 9241-210: Ergonomics of human-system interaction—Human-centred design. <https://www.iso.org/standard/77520.html>
27. INCOSE. (2015). *Systems engineering handbook* (4th ed.). Wiley.
28. Endsley, M. R., & Jones, D. G. (2025). *Designing for situation awareness* (3rd ed.). CRC Press.
29. Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., Elmqvist, N., & Diakopoulos, N. (2016). *Designing the user interface* (6th ed.). Pearson.
30. Dix, A., Finlay, J., Abowd, G. D., & Beale, R. (2004). *Human-computer interaction* (3rd ed.). Pearson.
31. Salas, E., Tannenbaum, S. I., Kraiger, K., & Smith-Jentsch, K. A. (2012). Training and development science. *Psychological Science in the Public Interest*, 13(2), 74–101. <https://doi.org/10.1177/1529100612436661>
32. Rasmussen, J., Pejtersen, A. M., & Goodstein, L. P. (1994). *Cognitive systems engineering*. Wiley.
33. Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89(4), 369–406. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.89.4.369>
34. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
35. Preston, C. C., & Colman, A. M. (2000). Optimal number of response categories. *Acta Psychologica*, 104(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(99\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(99)00050-5)

**Oleksandr Bushma**

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Computer Science,
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0000-0003-1604-6129
o.bushma@kubg.edu.ua

Oleksii Hubsnyi

postgraduate student, junior researcher of the Department of "Intelligent Control"
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0009-0004-3106-2770
gubish@gmail.com

ASSESSMENT OF THE VISUAL INTERFACE IMPACT ON THE EFFICIENCY OF DYNAMIC OBJECTS REMOTE CONTROL

Abstract. The paper is devoted to the development of an integral model for assessing the quality of human-machine interfaces operating in highly dynamic environments with increased requirements for operator reliability. The relevance of the study is determined by the need to bridge the gap between qualitative ergonomic characteristics of an interface and their quantitative representation within a unified metric framework. The proposed approach is based on a multi-level hierarchical structure of criteria in which conceptual interface properties are transformed into operational parameters and subsequently into discrete expert evaluations. The aggregation of partial indicators is performed through weighted mathematical processing, resulting in a single numerical integral index that reflects the overall quality of the interface.

A distinctive feature of the model is the simultaneous application of direct and inverse normalization procedures at the sub-criterion level. Inverse normalization is applied to unstimulating parameters (such as interface complexity, cognitive workload, number of manipulations, need for instructor assistance, etc.), ensuring a unified direction of influence for all model components. This methodological solution guarantees logical consistency of the integral index and reduces systematic distortions associated with heterogeneous parameter semantics.

The system for determining interface quality levels at the lower level of the criteria hierarchy was formed based on expert evaluation results. This approach provides the prerequisites for standardizing the assessment procedure and minimizing subjective bias. The established threshold ranges of the integral index enable unambiguous interpretation of results and support automated classification of interface quality.

The model is intended for application in the design, auditing, modernization, and certification of human-machine interfaces for complex technical systems, particularly those operating in high-responsibility and high-dynamics domains. It can also be integrated into decision-support software systems to facilitate structured evaluation processes. Future research is aimed at adapting the model to specific industry domains and empirically validating the correlation between the integral interface quality index and real indicators of operator performance efficiency.

Keywords: human-machine interface; visual interface; integral quality index; hierarchical model; multi-criteria analysis; normalization methods; inverse scaling; ergonomic assessment; expert evaluation; operator performance efficiency; remote control systems; decision support systems.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Yang, Y., Zhou, T., Zhu, Q., Vann, W., & Du, J. (2023). Brain functional connectivity under teleoperation latency: A fNIRS study. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2311.09062>
2. Shyshak, A. V., & Pupena, O. M. (2020). Lifecycle management of human-machine interfaces. Scientific Works of the National University of Food Technologies, 26(3), 17–27.



3. Riabovol, D. A. (2021). Analysis of visual information perception for designing additive cyber-design of human-machine interface for smart manufacturing. In Proceedings of the 25th International Youth Forum “Radio Electronics and Youth in the 21st Century” (Vol. 2, pp. 21–22).
4. Liu, H., et al. (2026). Operational performance, cognitive load, visual attention, and usability of fixed-, manual-, and autonomous-camera control in telemanipulation systems. *Applied Ergonomics*, 130, 104647. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104647>
5. Smalko, O. (2025). Evolution of digital interfaces. *Bulletin of Kamianets-Podilskiy National Ivan Ohiienko University. Physical and Mathematical Sciences*, 18, 115–120.
6. Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2015). *Engineering psychology and human performance* (4th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315665177>
7. Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 32–64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>
8. Telli, K., Kraa, O., Himeur, Y., Ouamane, A., Boumehraz, M., Atalla, S., & Mansoor, W. (2023). A comprehensive review of UAV research trends. *Systems*, 11(8), 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>
9. Hubskyi, O. M. (2024). Analysis of user interfaces for UAV ground control stations. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2024(3), 5–21. <https://doi.org/10.15407/kvt217.03.005>
10. Anderson, C., Efav, A., Emery, E., Mueller, J., & Schreiner, J. (2017). Next generation universal ground control system HMI design. *Industrial and Systems Engineering Review*, 5(2).
11. Spiliotopoulos, K., Rigou, M., & Sirmakessis, S. (2018). Skeuomorphic vs flat design: UX comparison. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), 31. <https://doi.org/10.3390/mti2020031>
12. Miraz, M. H., Ali, M., & Excell, P. S. (2021). Adaptive user interfaces and usability. *Computer Science Review*, 40, 100363. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100363>
13. Brdnik, S., Heričko, T., & Šumak, B. (2022). Intelligent user interfaces: A systematic mapping study. *Sensors*, 22(15), 5830. <https://doi.org/10.3390/s22155830>
14. Picardi, A., & Caruso, G. (2024). User-centered evaluation framework for AR interaction design. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(5), 41. <https://doi.org/10.3390/mti8050041>
15. Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with multiple objectives: Preferences and value trade-offs*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084>
16. Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
17. Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2013). *Systems engineering and analysis* (5th ed.). Pearson.
18. Nielsen, J. (1993). *Usability engineering*. Academic Press.
19. Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2013). *Engineering psychology and human performance* (4th ed.). Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781315665177>
20. Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>
21. Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159–177. <https://doi.org/10.1080/14639220210123806>
22. Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). Human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A*, 30(3), 286–297. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
23. Sheridan, T. B. (2002). *Humans and automation: System design and research issues*. Wiley.
24. Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. MIT Press.
25. Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem. *Human Factors*, 37(2), 381–394. <https://doi.org/10.1518/0018720957790645>
26. International Organization for Standardization. (2019). ISO 9241-210: Ergonomics of human-system interaction—Human-centred design. <https://www.iso.org/standard/77520.html>
27. INCOSE. (2015). *Systems engineering handbook* (4th ed.). Wiley.
28. Endsley, M. R., & Jones, D. G. (2025). *Designing for situation awareness* (3rd ed.). CRC Press.
29. Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., Elmqvist, N., & Diakopoulos, N. (2016). *Designing the user interface* (6th ed.). Pearson.
30. Dix, A., Finlay, J., Abowd, G. D., & Beale, R. (2004). *Human-computer interaction* (3rd ed.). Pearson.
31. Salas, E., Tannenbaum, S. I., Kraiger, K., & Smith-Jentsch, K. A. (2012). Training and development science. *Psychological Science in the Public Interest*, 13(2), 74–101. <https://doi.org/10.1177/1529100612436661>
32. Rasmussen, J., Pejtersen, A. M., & Goodstein, L. P. (1994). *Cognitive systems engineering*. Wiley.



33. Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89(4), 369–406. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.89.4.369>
34. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
35. Preston, C. C., & Colman, A. M. (2000). Optimal number of response categories. *Acta Psychologica*, 104(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(99\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(99)00050-5)

Отримано редакцією журналу / Received: 18.01.26
Прорецензовано / Revised: 04.02.26
Схвалено до друку / Accepted: 26.03.26



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.