

УДК 531.7

DOI: 10.18372/2073-4751.85.21090

Волков О. Є.,
orcid.org/0000-0002-5418-6723,
alexvolk@ukr.net,
Губський О. М.,
orcid.org/0009-0004-3106-2770,
gubish@gmail.com.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ НА ОСНОВІ КРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ВІЗУАЛЬНИХ ЛЮДИНО- МАШИННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

Інститут інформаційних технологій та систем
Національної академії наук України, Київ, Україна

Вступ

Системи дистанційного керування динамічними об'єктами характеризуються стрімким ускладненням їх функціональних можливостей та зростанням рівня автоматизації процесів керування. Сучасні комплекси дедалі частіше інтегрують інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, засоби ситуаційної обізнаності та мультимодальні технології візуалізації, що суттєво змінює характер взаємодії оператора з технічною системою. За таких умов ефективність керування визначається якістю візуальних людино-машинних інтерфейсів (ЛМІ), через які здійснюється сприйняття, інтерпретація та передавання керуючих дій.

Підвищення складності систем керування призводить до збільшення обсягів інформації, що відображається оператору, тоді як його когнітивні та психофізіологічні можливості залишаються незмінними. Це призводить до виникнення суперечності між інформаційною насиченістю інтерфейсу та здатністю оператора підтримувати необхідний рівень ситуаційної обізнаності під час виконання завдань керування.

Процес людино-машинної взаємодії в системах віддаленого керування динамічними об'єктами

характеризується високою інтенсивністю інформаційного обміну та необхідністю прийняття рішень у реальному часі в умовах недетермінованого середовища. Ефективність такої взаємодії безпосередньо залежить від здатності візуального інтерфейсу адекватно передавати стан об'єкта, мінімізуючи когнітивне навантаження на оператора та компенсуючи часові затримки передачі сигналу. Оптимізація цього процесу вимагає переходу від статичних ергономічних схем до динамічних моделей, які враховують психофізіологічні особливості людини-оператора та специфіку поведінки об'єкта керування як замкненої біотехнічної системи.

Пропонується досягти підвищення ефективності дистанційного керування шляхом впровадження розробленої системи критеріальної оцінки, що базується на параметричній моделі та моделях аналізу візуальних інтерфейсів. На відміну від традиційних експертних підходів, запропонована система критеріїв дає змогу кількісно оцінити якість представлення даних через показники ергономіки, когнітивної відповідності, інформаційної складності, надійності та предикативності.

Результати дослідження систем керування динамічними об'єктами

розглянуті крізь призму людино-машинної взаємодії дозволили сформулювати та обґрунтувати гіпотезу щодо підвищення ефективності дистанційного керування за рахунок впровадження методу критеріальної оцінки візуальних інтерфейсів, що забезпечує кількісне вимірювання якості взаємодії оператора з системою.

Основою запропонованого підходу є нова класифікація ЛМІ, яка інтегрує шість ключових груп критеріальних ознак: від показників когнітивного навантаження та ергономічності до параметрів технічної реалізації. Практичне застосування моделі, сформованої на основі цієї класифікації дає змогу систематизувати інтерфейси за рівнем їхньої ергономічної якості, що створює підґрунтя для об'єктивного вибору та оптимізації інструментів керування динамічними об'єктами.

Мета

Метою роботи є підвищення ефективності віддаленого керування динамічними об'єктами на основі застосування моделі критеріальної інтегральної оцінки візуальних людино-машинних інтерфейсів.

Основна частина

Методологічну основу роботи становить комплексний науковий інструментарій, що базується на системному аналізі технічних параметрів та експертному оцінюванні компонентів людино-машинної взаємодії. Системний підхід застосовано для структуризації процесів керування життєвим циклом ЛМІ, що дає змогу забезпечити цілісність проектування від концепції до експлуатації.

Емпіричним базисом дослідження слугували технічні характеристики візуальних ЛМІ [1], а також статистичні показники операторської діяльності, які детермінують вплив візуальної уваги та когнітивного навантаження на якість керування [2]. Окрім того, при розробці архітектури інтерфейсів враховано фундаментальні результати досліджень

щодо сприйняття візуальної інформації [3].

Теоретичний базис формування системи критеріїв оцінювання ґрунтується на положеннях теорії динамічних систем та принципах інженерної психології. Це дозволило узгодити топологію графічних елементів із моделями ситуаційної обізнаності оператора, забезпечивши підвищення продуктивності людино-машинної системи в умовах дистанційного керування динамічними об'єктами.

Дослідження у сфері людино-машинної взаємодії показують, що ефективність інтерфейсів безпосередньо пов'язана з когнітивним навантаженням оператора та організацією візуального простору. Зокрема, для оцінки впливу дизайну ЛМІ на когнітивне навантаження було доведено, що структура та спосіб подання інформації в інтерфейсі безпосередньо впливають на рівень когнітивного навантаження оператора під час керування безпілотними системами [4].

Аналогічні результати отримані у дослідженнях телопераційних систем, показали, що правильно спроектовані інтерфейси здатні компенсувати обмеження просторових когнітивних здібностей оператора [5].

Крім того, сучасні підходи до аналізу інтерфейсів дедалі частіше враховують розподіл уваги користувача та механізми візуального сприйняття, що дає змогу оптимізувати структуру інформаційного поля інтерфейсу та підвищити ефективність взаємодії оператора з автономними системами [6].

Важливим недоліком ЛМІ при здійсненні віддаленого керування є невисокий рівень інтеграції людиноцентричних елементів у дизайн інтерфейсів. Дослідження показують, що підвищений рівень автоматизації може призводити до зниження ситуаційної обізнаності оператора, збільшення когнітивного навантаження та виникнення феномену out-of-the-loop

або втрати залученості оператора, коли оператор не встигає втрутитись у часі при позаштатних ситуаціях[7].

Крім того, окремою проблемою є обмежені можливості адаптивності інтерфейсів, коли системи не враховують різні рівні підготовки користувачів або зміну їхнього психофізіологічного стану під час місії [8]. У наведеному огляді показано, що недостатня підтримка когнітивної гнучкості та відсутність механізмів адаптивного відображення інформації є ключовими бар'єрами для підвищення ефективності інтерфейсів пультів керування. Слід врахувати, що системи мають бути здатними підлаштовувати рівень деталізації, структуру меню та алгоритми виводу інформації до поточних можливостей оператора.

Разом з тим у більшості досліджень основна увага приділяється оптимізації окремих елементів інтерфейсу або аналізу когнітивного навантаження оператора, тоді як питання формування універсальної системи критеріїв оцінювання ефективності візуальних людино-машинних інтерфейсів систем віддаленого керування залишаються недостатньо опрацьованими. Тому необхідне розроблення формалізованих моделей оцінювання, для здійснення аналізу ЛМІ та визначення їх впливу на ефективність роботи оператора.

Сучасний стан підходів до проектування інтерфейсів характеризується суперечністю між функціональною складністю систем та психофізіологічними лімітами оператора щодо обробки візуальної інформації. Відсутність формалізованих критеріїв і математичних алгоритмів оцінювання заважає об'єктивному визначенню якості ЛМІ, що спричиняє зростання когнітивного навантаження та втрату ситуаційної обізнаності. [9].

Постає необхідність у розробці науково-методичного апарату для класифікації чинників впливу. Це дозволить автоматизувати оцінку

ефективності ЛМІ і оптимізувати підготовку фахівців, перейшовши від емпіричних підходів до проектування [10].

Групи підходів до проектування інтерфейсів віддаленого керування динамічними об'єктами доцільно розглядати як систематизовану сукупність концептуальних напрямів, що відображають різні аспекти організації людино-машинної взаємодії, зокрема з позицій ергономіки, когнітивного навантаження, функціональної структури, рівня автоматизації та адаптивності інтерфейсу. Узагальнення цих підходів дає змогу сформулювати цілісне уявлення про сучасні принципи проектування інтерфейсних рішень у складних технічних системах. Відповідні групи підходів наведено та візуалізовано на рис. 1, де відображено їх логічну структуру та взаємозв'язки.

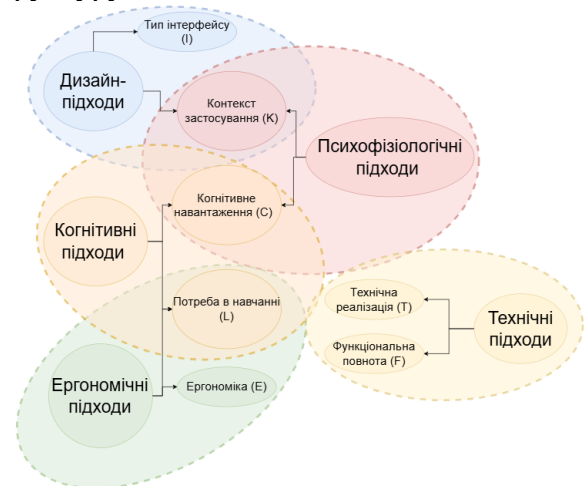


Рис. 1. Групи підходів до проектування інтерфейсів віддаленого керування динамічними об'єктами

Запропонована ієрархічна архітектура моделі відображає послідовний перехід від узагальнених концептуальних характеристик інтерфейсу до формалізованих параметрів його оцінювання. На верхньому рівні структури виділено групи критеріїв, що описують ключові аспекти ефективності ЛМІ, зокрема

ергономіку, когнітивне навантаження оператора, рівень автономності системи, функціональну повноту, особливості типу інтерфейсу та потребу в навчанні, що наведено на рис. 2. Ці домени репрезентують узагальнені системні властивості інтерфейсу та характеризують різні аспекти взаємодії оператора з системою віддаленого керування.



Рис. 2. Система критеріїв оцінювання

Така декомпозиція охоплює об'єктивні параметри системної складності і суб'єктивні реакції, що відповідає сучасним концепціям теорії когнітивного навантаження. Це уможливорює формування кількісної оцінки когнітивної складності взаємодії у ЛМІ [11].

На другому рівні ієрархії зазначені концептуальні домени деталізуються через систему підкритеріїв, що відображають конкретні структурні

характеристики інтерфейсу. Підкритерії виконують роль операційних параметрів, які дозволяють описати прояви відповідних властивостей у вимірюваному середовищі. Саме на цьому рівні формується структура параметричної моделі оцінювання, а кожному показнику призначається локальна вага λ_{sj} , що визначає його відносну значущість у межах відповідної групи критеріїв.

Третій рівень моделі реалізує механізм кількісної інтерпретації підкритеріїв. На цьому рівні параметри інтерфейсу отримують дискретні експертні оцінки, що відображає ступінь відповідності інтерфейсу встановленим вимогам. Отримані значення використовуються для подальшого агрегування у межах інтегральної функції оцінювання.

Рівень експертних оцінок не включено до графічної схеми, оскільки він виконує роль операційного механізму квантифікації параметрів моделі та реалізується безпосередньо під час процедури оцінювання.

Запропонована структура дає змогу узгодити концептуальний опис властивостей інтерфейсу з формалізованою процедурою їх оцінювання та створює основу для побудови інтегральної функції ефективності, у якій враховуються вагові коефіцієнти груп критеріїв ω_i та локальні ваги підкритеріїв λ_{ij} .

Сформована ієрархічна структура критеріїв і підкритеріїв створює основу для побудови формальної параметричної моделі інтегрального оцінювання якості візуального людино-машинного інтерфейсу.

Враховуючи багатомірний характер досліджуваного об'єкта, оцінювання ефективності інтерфейсних рішень передбачає агрегування різномірних показників, що відображають ергономічні, когнітивні, функціональні та технічні аспекти взаємодії оператора з системою віддаленого керування.

У межах запропонованого підходу критерії верхнього рівня відображають узагальнені системні властивості інтерфейсу, які безпосередньо не підлягають прямому вимірюванню. Натомість підкритерії виступають як операційні показники, що характеризують конкретні прояви відповідних властивостей у процесі взаємодії оператора з інтерфейсом. На нижньому рівні ієрархії ці показники набувають кількісної форми у вигляді дискретних експертних оцінок, які визначають ступінь відповідності інтерфейсу встановленим вимогам.

Для переходу від локальних характеристик до узагальненої оцінки використовується адитивна модель багатокритеріального агрегування. У цій моделі кожному критерію верхнього рівня відповідає локальна вага λ_j , що відображає його значущість у межах відповідної групи характеристик. Водночас кожна група критеріїв характеризується вагою складника ω_i , яка визначає внесок цієї групи у формування інтегральної оцінки інтерфейсу. На основі цих величин визначається абсолютна вага показника ω_i , що характеризує сумарний вплив конкретного підкритерію на загальний результат оцінювання. Формально вона визначається як Інтегральна оцінка ефективності людино-машинного інтерфейсу формується шляхом дворівневого агрегування показників. На першому рівні виконується згортання значень підкритеріїв у межах відповідної групи характеристик, після чого на другому рівні здійснюється агрегування групових оцінок з урахуванням їх вагових коефіцієнтів.

З урахуванням ієрархічної структури критеріїв інтегральний показник ефективності інтерфейсу S визначається як

$$S = \sum_{i=1}^6 \omega_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} \cdot p_{ij} \right) =$$

$$= \omega_E \cdot (\lambda_{Evh} \cdot p_{Evh} + \lambda_{Eint} \cdot p_{Eint} + \lambda_{Ecl} \cdot p_{Ecl} + \lambda_{Efb} \cdot p_{Efb} + \lambda_{Etm} \cdot p_{Etm}) + \omega_C \cdot (\lambda_{Cld} \cdot p_{Cld} + \lambda_{Cmt} \cdot p_{Cmt} + \lambda_{Car} \cdot p_{Car}) + \omega_A \cdot (\lambda_{Aal} \cdot p_{Aal} + \lambda_{Amn} \cdot p_{Amn} + \lambda_{Aap} \cdot p_{Aap}) + \omega_F \cdot (\lambda_{Fin} \cdot p_{Fin} + \lambda_{Fex} \cdot p_{Fex} + \lambda_{Fau} \cdot p_{Fau}) + \omega_I \cdot (\lambda_{Ity} \cdot p_{Ity} + \lambda_{Lin} \cdot p_{Lin} + \lambda_{Imb} \cdot p_{Imb}) + \omega_L \cdot (\lambda_{Ltm} \cdot p_{Ltm} + \lambda_{Ltr} \cdot p_{Ltr} + \lambda_{Lcx} \cdot p_{Lcx}),$$

у наведеному виразі:

- $\omega_E, \omega_C, \omega_A, \omega_F, \omega_I, \omega_L$ – 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;

- $p_{Evh}, p_{Eint}, p_{Ecl}, p_{Efb}, p_{Etm}$ – значення підкритеріїв критерію «Ергономіка»: «Візуальна ієрархія»,

«Інтуїтивність», «Кількість кліків», «Навчальність фідбеку», «Час до дії», відповідно;

- ω_{Fin} , ω_{Fex} , ω_{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;

- ω_{Ity} , ω_{Lin} , ω_{Imb} – локальні ваги підкритеріїв критерію «Тип інтерфейсу»: «Тип GUI», «Кількість каналів введення», «Мобільність», відповідно;

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

- ω_{Ltm} , ω_{Ltr} , ω_{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.

Запропонована дворівнева модель агрегування дає змогу врахувати ієрархічну структуру критеріїв оцінювання та забезпечує прозору інтерпретацію внеску кожної групи характеристик і окремого показника у формування інтегральної оцінки ефективності людино-машинного інтерфейсу.

Оцінка отриманих результатів

Для формалізованого оцінювання ефективності візуальних людино-машинних інтерфейсів було сформовано дворівневу систему вагових коефіцієнтів. Цей підхід дозволив

враховувати відносну важливість як окремих характеристик інтерфейсу у загальній структурі оцінювання, так і вагу складника для цілого класу характеристик. У межах запропонованого підходу використовуються три основні типи вагових показників: локальна вага критерію (λ_j), вага складника (ω_c) та абсолютна вага показника (ω_i).

Локальна вага λ_j визначає значущість окремого критерію в границях відповідного класу характеристик. У дослідженні виділено шість базових груп критеріїв: ергономічні (E), автономності (A), навчання (L), когнітивні (C), інтерфейсні (I), функціональні (F)ю Кожна група включає набір характеристик, що відображають специфічні аспекти людино-машинної взаємодії.

Вага складника ω_c визначає відносну значущість окремої групи критеріїв у структурі інтегральної оцінки інтерфейсу. Цей показник дає змогу врахувати внесок кожного класу характеристик у загальну ефективність системи керування.

Абсолютна вага показника ω_i розраховується як добуток локальної ваги критерію на вагу відповідної групи характеристик і визначає сумарний внесок конкретної характеристики у загальну інтегральну оцінку інтерфейсу.

В таблиці 1 подано експертне оцінювання вагових коефіцієнтів, яке було виконано для двох систем віддаленого керування: RC Simulator, який використовується переважно як тренажерне середовище підготовки операторів, та Mission Planner, що є функціональною наземною станцією керування безпілотними платформами.

Таблиця 1. Експертне оцінювання вагових коефіцієнтів та розрахунок значень зважених показників.

Характеристика	Локальна вага (λ_j)	Вага компоненти (ω_c)	Абсолютна вага (ω_i)	Бал (R C)	Бал (M P)	Зважений показник, $RC \cdot \omega_i$	Зважений показник, $MP \cdot \omega_i$
Інтуїтивність (Eint)	0,25	0,25	0,0625	3	2	0,1875	0,125
Час до дії (Etm)	0,25	0,25	0,0625	2	3	0,1250	0,1875
Кількість кліків (Ecl)	0,15	0,25	0,0375	1	2	0,0375	0,0750
Доступність зворотного зв'язку (Efb)	0,20	0,25	0,0500	2	3	0,1000	0,1500
Візуальна ієрархія (Evh)	0,15	0,25	0,0375	2	3	0,0750	0,1125
Рівень автоматизації (Aal)	0,50	0,15	0,0750	2	3	0,1500	0,2250
Кількість ручних дій (Amn)	0,25	0,15	0,0375	1	2	0,0375	0,0750
Доступність автопілота (Aap)	0,25	0,15	0,0375	2	3	0,0750	0,1125
Час навчання (Ltm)	0,50	0,10	0,0500	2	1	0,1000	0,0500
Вимоги до інструктора (Ltr)	0,25	0,10	0,0250	2	3	0,0500	0,0750
Складність інтерфейсу (Lcx)	0,25	0,10	0,0250	3	1	0,0750	0,0250
Суб'єктивне навантаження (Cld)	0,40	0,15	0,0600	3	2	0,1800	0,1200
Кількість одночасних завдань (Cmt)	0,20	0,15	0,0300	3	2	0,0900	0,0600
Рутинна автоматизація (Car)	0,40	0,15	0,0600	2	3	0,1200	0,1800
Тип графічного інтерфейсу (Ity)	0,40	0,05	0,0200	2	3	0,0400	0,0600
Кількість вхідних каналів (Iin)	0,30	0,05	0,0150	2	3	0,0300	0,0450
Мобільність (Imb)	0,30	0,05	0,0150	3	2	0,0450	0,0300
Інтеграція функцій (Fin)	0,40	0,15	0,0600	1	3	0,0600	0,1800
Зовнішні інструменти/засоби (Fex)	0,20	0,15	0,0300	3	2	0,0900	0,0600
Автоматизовані дії (Fau)	0,40	0,15	0,0600	1	3	0,0600	0,1800

Для кожної характеристики визначено її абсолютну вагу ω_i , після чого обчислено зважені оцінки $RC \cdot \omega_i$ та $MP \cdot \omega_i$, що відображають внесок відповідного показника у сумарну оцінку інтерфейсу RC Simulator та Mission Planner відповідно. Такий підхід дає змогу отримати інтегральні значення ефективності інтерфейсів та виконати їх об'єктивне порівняння з урахуванням структури критеріїв і відносної важливості окремих характеристик.

Оцінювання інтерфейсів здійснюється з використанням дискретної шкали, значення якої варіюються в діапазоні від 1 до 3.

Оцінювання підкритерію «Кількість кліків» Ecl 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» Etm прийнято градацію: значення 3 відповідає тривалості менше 3 с, значення 2 — у діапазоні від 3 до 7 с, значення 1 — понад 7 с. Інтервал від 3 до 7 с інтерпретується як емпірично визначений перехідний поріг, після якого реакція оператора втрачає миттєвий характер і класифікується як затримана, що відповідає рівню якості R2.

Підкритерій «Кількість одночасних задач» Smt відображає когнітивне навантаження. Рівень якості R1 відповідає фокусуванню на одній задачі з оцінкою 3, тоді як перевищення трьох паралельних задач зумовлює присвоєння оцінки 1 та автоматичне віднесення інтерфейсу до критичного рівня якості R3.

Оцінювання підкритерію «Кількість каналів введення» Iin 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» структурується за тривалістю: значення 3 відповідає тривалості не більше 1 години, значення 2 — від 1 до 4 годин, значення 1 — понад 4 години. Запропоновані пороги відображають перехід від швидкої адаптації до ситуації, в якій навчання стає обмежувальним чинником ефективності експлуатації системи.

Для окремих підкритеріїв у моделі застосовано інверсну 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» Cld. У 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.

Та сама логіка застосовується до підкритерію «Кількість ручних дій» Amn, де інверсія шкали відображає ступінь автоматизації операцій. Зростання 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» Fex 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_{sx} 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.

Порівняльний аналіз

Для верифікації розробленої критеріальної системи підвищення ефективності роботи ЛМІ було обрано два функціонально відмінні типи інтерфейсів: RC Simulator та Mission Planner [12, 13]. Вибір цих платформ зумовлений їхньою роллю у життєвому циклі керування безпілотними комплексами. RC Simulator використовується як спеціалізоване середовище для первинної підготовки операторів та відпрацювання навичок візуального пілотування, тоді як Mission Planner є повнофункціональною наземною станцією керування для планування та виконання складних автономних місій. Таке поєднання дає змогу оцінити ефективність людиномашинної взаємодії як на етапі навчання, так і в умовах реальної експлуатації.

Для порівняльного аналізу конкуруючих ЛМІ інтегральний показник обчислюється окремо для кожної системи. Нехай S_{RC} та S_{MP} — інтегральні оцінки інтерфейсів RC Simulator та Mission Planner. Тоді відповідні показники визначаються:

$$S_{RC} = \sum_{i=1}^6 \omega_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} \cdot p_{ij}^{RC} \right)$$

$$S_{MP} = \sum_{i=1}^6 \omega_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} \cdot p_{ij}^{MP} \right)$$

у наведеному виразі:

- p_{ij}^{RC} - значення j-того показника для інтерфейсу RC Simulator
- p_{ij}^{MP} - значення j-того показника для інтерфейсу Mission Planner

Для безпосереднього порівняння ефективності інтерфейсів використовується різниця інтегральних оцінок:

$$\Delta S = S_{MP} - S_{RC}$$

З урахуванням абсолютних ваг показників модель може бути подана у спрощеній формі:

$$S_{RC} = \sum_{i=1}^n p_i^{RC} \cdot \lambda_i$$

$$S_{MP} = \sum_{i=1}^n p_i^{MP} \cdot \lambda_i$$

У цьому випадку внесок кожної характеристики у загальну оцінку визначається добутком значення показника або його балу на його абсолютну вагу, що відповідає зваженим показникам $RC \cdot \omega_i$ та $MP \cdot \omega_i$, наведеним у таблиці результатів 1.

Запропонована модель дає змогу не лише отримати інтегральну оцінку інтерфейсів, але й виконувати детальний аналіз внеску окремих характеристик у загальний результат, що є важливим для оптимізації структури людиномашинного інтерфейсу систем віддаленого керування.

Отримані результати дозволили сформулювати масив кількісних даних, що відображають специфіку кожного інтерфейсу відповідно до шести груп критеріальних ознак. Це дозволило побудувати порівняльні профілі у вигляді діаграм-зірок (рис.3), які трансформують сукупність розрахованих показників у наочну геометричну модель двох репрезентативних систем: тренажерного

середовища RC Simulator та повнофункціональної наземної станції керування Mission Planner.

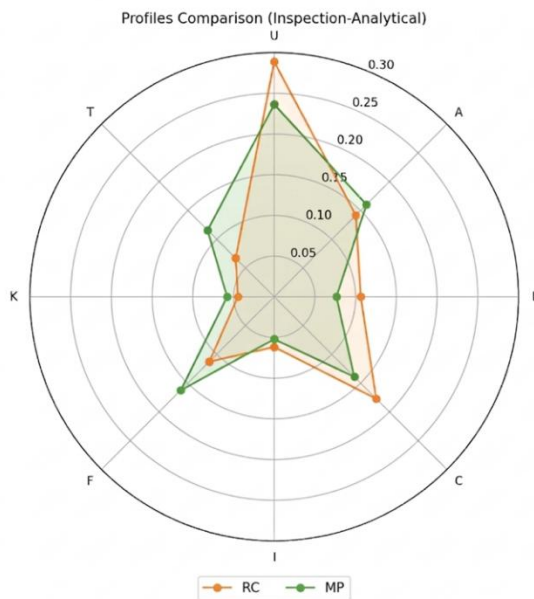


Рис 3. Приклад порівняння профілів

Використання діаграм-зірок дає змогу ідентифікувати ступінь відповідності інтерфейсу вимогам конкретної місії через площу та конфігурацію утвореної фігури. Застосування цих візуальних моделей забезпечує можливість миттєвого порівняння конкуруючих ЛМІ, виявляючи сильні та слабкі сторони архітектури кожної системи.

Висновки

У роботі запропоновано підхід до підвищення ефективності віддаленого керування динамічними об'єктами шляхом розроблення інтегральної моделі оцінювання візуальних ЛМІ систем віддаленого керування. Застосування розробленої ієрархічної моделі оцінювання, яка забезпечує формалізацію структури критеріїв, введення вагових коефіцієнтів різних рівнів та побудову інтегрального показника ефективності інтерфейсу забезпечує підвищення ефективності керування динамічними об'єктами. Оскільки запропонований підхід дозволив перейти від суб'єктивних експертних оцінок до кількісно

обґрунтованого показника якості, що забезпечив швидке об'єктивне порівняння інтерфейсних рішень та визначення їх впливу на ефективність діяльності оператора. Отримані результати дозволили підтвердити можливість практичного використання моделі для аналізу та оптимізації інтерфейсів систем віддаленого керування.

Запропонований підхід базується на ієрархічній структурі критеріїв, що включає концептуальні домени верхнього рівня, систему підкритеріїв та процедуру їх кількісного оцінювання за дискретною експертною шкалою. Така структура дає змогу формалізувати суб'єктивні експертні судження та трансформувати їх у кількісну інтегральну оцінку якості інтерфейсу.

Методологічною основою моделі є використання багатокритеріального адитивного агрегування показників із урахуванням вагових коефіцієнтів різних рівнів ієрархії. У межах запропонованого підходу для кожної групи критеріїв визначається вага складника ω_i , а для окремих характеристик — локальні ваги λ_{ij} , що дає змогу обчислювати їх абсолютні ваги та визначати внесок кожного показника у формування інтегрального індексу ефективності інтерфейсу. Використання уніфікованої шкали експертного оцінювання забезпечує узгодженість напрямів впливу різних характеристик та підвищує коректність інтегрального показника.

Запропонована модель створює формалізовану основу для порівняльного аналізу різних інтерфейсних рішень. На її основі може бути визначено інтегральний показник ефективності інтерфейсу, що дає змогу виконувати об'єктивне порівняння програмно-апаратних комплексів керування, аналізувати внесок окремих характеристик у загальний результат та визначати напрями оптимізації структури людино-машинної взаємодії.

Практичне значення моделі полягає у можливості її застосування на етапах проектування, експертного аналізу, модернізації та оцінювання інтерфейсів складних технічних систем. Потенційною сферою використання є системи віддаленого керування динамічними об'єктами, зокрема наземні станції керування безпілотними комплексами, роботизованими платформами, транспортними та диспетчерськими системами, де ефективність діяльності оператора безпосередньо залежить від якості інтерфейсу.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення системи критеріїв оцінювання з урахуванням специфіки різних типів операторських систем, адаптацію моделі до конкретних класів інтерфейсів та проведення експериментальної валідації отриманих результатів. Перспективним напрямом є також дослідження взаємозв'язку між інтегральним показником ефективності інтерфейсу та реальними показниками діяльності оператора, такими як час виконання завдання, рівень когнітивного навантаження та показники ситуаційної обізнаності.

Література

1. Hubskeyi, O. M. (2024). Analysis of user interfaces for ground control stations of unmanned aerial vehicles. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2024(3), 5–21. <https://doi.org/10.15407/kvt217.03.005>
2. Liu, H., et al. (2026). Operational performance, cognitive load, visual attention, and usability of fixed-, manual-, and autonomous-camera control in single- and multiple-camera telemanipulation systems. *Applied Ergonomics*, 130, Article 104647. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104647>
3. Рябовол, Д. А. (2021). Аналіз досліджень щодо сприйняття візуальної інформації для проектування адитивного кібер-дизайну людино-машинного інтерфейсу для Smart Manufacturing. У *Радіоелектроніка та молодь у XXI*

столітті: матеріали 25-го Міжнар. молодіж. форуму (Т. 2, с. 21–22). ХНУРЕ.

4. Wenjuan Zhang, Yunmei Liu, David B. Kaber, Effect of interface design on cognitive workload in unmanned aerial vehicle control, *International Journal of Human-Computer Studies*, Volume 189, 2024, 103287, ISSN 1071-5819, <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103287>
5. Haonan Fang, Yaoguang Hu, Shanguang Chen, Xiaonan Yang, Yan Zhao, Hongwei Niu, Chenfei Cai, Effects of interface design and spatial ability on teleoperation cognitive load and task performance, *Displays*, Volume 87, 2025, 102977, ISSN 0141-9382, <https://doi.org/10.1016/j.displa.2025.102977>
6. Zhenhao Luo, Cheng Zhang, Xiao Yang, Bin Xie, Zihan Yang, Zhenghe Song, Enrong Mao, A human visual attention analysis model for remote interaction interface of unmanned agricultural vehicles, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 227, Part 1, 2024, 109516, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109516>
7. Alharasees, O., Kale, U. Human Factors and AI in UAV Systems: Enhancing Operational Efficiency Through AHP and Real-Time Physiological Monitoring. *J Intell Robot Syst* 111, 5 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02188-y>
8. Wenjuan Zhang, D. Feltner, J. Shirley, M. Swangnetr and D. Kaber, "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, 2016, pp. 001821-001826, doi: <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844502>
9. Zhou, Feng & Duh, Henry & Billinghurst, Mark. (2008). Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: A Review of Ten Years of ISMAR. 2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. 2.193-202. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637362>

10. Holzinger, A., Carrington, A., & Müller, H. (2020). Measuring the quality of explanations: The system causability scale (SCS). *KI – Künstliche Intelligenz*, 34, 193–198. <https://doi.org/10.1007/s13218-020-00636-z>

11. Picardi, A., & Caruso, G. (2024). User-centered evaluation framework to support the interaction design for augmented reality applications. *Multimodal*

Technologies and Interaction, 8(5), 41. <https://doi.org/10.3390/mti8050041>

12. Osborne, M. (2024). *Mission Planner Home*. ArduPilot Dev Team. <https://ardupilot.org/planner/>

13. Rowlands, D. (2024). *PicaSim: The Flight Simulator*. <http://www.rowlhouse.co.uk/picasim/>

Волков О.Є., Губський О.М.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ НА ОСНОВІ КРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ВІЗУЛЬНИХ ЛЮДИНО-МАШИНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

У науковій статті вирішено актуальну науково-технологічну задачу підвищення ефективності дистанційного керування динамічними об'єктами та забезпечення ергономічної якості візуальних людино-машинних інтерфейсів. У межах дослідження розроблено інформаційну технологію оцінювання, яка ґрунтується на використанні ієрархічно структурованої системи критеріїв та забезпечує формалізований аналіз ефективності людино-машинної взаємодії з визначенням інтегрального показника якості інтерфейсу. Показано, що ефективність систем дистанційного керування значною мірою визначається узгодженням розподілом характеристик інтерфейсу за критеріями когнітивного навантаження та функціональної повноти. Це дає змогу обґрунтовано здійснювати вибір та оптимізацію інтерфейсних рішень відповідно до специфіки задач і типів місій, підвищуючи результативність операторської діяльності в умовах складного інформаційного середовища.

Ключові слова: динамічний об'єкт, людино-машинний інтерфейс, інтегральний показник якості, експертне оцінювання.

Volkov O.Ye., Hubsykyi O.M

IMPROVING REMOTE CONTROL EFFICIENCY FOR DYNAMIC SYSTEMS THROUGH CRITERIAL EVALUATION OF VISUAL HUMAN-MACHINE INTERFACES

The scientific article addresses the critical socio-technological challenge of enhancing the efficiency of remote control for dynamic objects and ensuring the ergonomic quality of visual human-machine interfaces. Within the scope of the study, an information technology for evaluation has been developed, based on a hierarchically structured system of criteria. This technology provides a formalized analysis of human-machine interaction efficiency by determining the integral quality index of the interface. It is demonstrated that the efficiency of remote control systems is significantly determined by the balanced distribution of interface characteristics across the criteria of cognitive workload and functional completeness. This enables a justified selection and optimization of interface solutions tailored to specific tasks and mission types, thereby increasing the performance of operator activities within complex information environments.

Keywords: dynamic object, human-machine interface (HMI), integral quality index, expert assessment, remote control, criterion-based evaluation

Стаття подана до редакції: 25/03/2026

Стаття прийнята до опублікування: 30/03/2026

Стаття опублікована: 27/04/2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0