

І. П. СІНІЦІН

доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент Національної академії наук України, директор  
Інститут програмних систем Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-4120-0784

С. В. ЗАДВОРНИЙ

аспірант  
Інститут програмних систем Національної академії наук України  
ORCID: 0009-0007-8788-3916

О. П. ІЛЬІНА

кандидат фізико-математичних наук,  
провідний науковий співробітник  
Інститут програмних систем Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-3111-9310

## МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПІДТРИМКИ КОРИСТУВАЦЬКОЇ ЦЕНТРОВАНОСТІ ІНТЕРФЕЙСУ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ ОБОРОННОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У статті представлено розширений науково-методичний підхід до побудови та підтримки користувацько-центричного дизайну інтерфейсу інформаційних систем оборонного призначення (ІСОП), який інтегрує концептуальні моделі, формальні описи інтерфейсних послуг, спостереження за користувацькою поведінкою та методи машинного навчання. Актуальність дослідження визначається необхідністю забезпечення стабільної ефективності інтерфейсу в умовах високої динамічності цільових задач, різномірності ролей користувачів та підвищених вимог до точності виконання операцій у критичних сценаріях. У роботі сформовано багаторівневу модель, яка описує структуру інтерфейсних послуг, параметри їх реалізації, взаємозв'язок з ключовими показниками ефективності (KPI) та вплив характеристик поведінки користувачів на досяжність цих показників. Особливу увагу приділено створенню узагальненої класифікації параметрів формату інтерфейсних послуг, що охоплює структурні, функціональні, перцептивні та маніпулятивні властивості інтерфейсу, а також контекстні фактори використання. На основі зібраних архівів спостережень та порівняння з аналогами запропоновано методи виявлення критичних характеристик, які суттєво впливають на якість інтерфейсної підтримки. Для ухвалення рішень у життєвому циклі ІСОП запропоновано використання моделей машинного навчання для: прогнозування рівня досяжності KPI залежно від реалізованого формату інтерфейсної послуги; класифікації потенційних порушень вимог до інтерфейсу; аналізу ризиків неузгодженості вимог; оцінювання ефективності заходів із модернізації та реінжинірингу. Запропонований підхід забезпечує формування єдиного інформаційно-аналітичного середовища, яке підтримує проектування, аудит, експлуатаційний моніторинг та підвищення якості інтерфейсу ІСОП на основі об'єктивних даних, формальних моделей і відтворюваних методів аналітики.

**Ключові слова:** інтерфейс користувача, інтерфейсні послуги, UCD, інформаційна система оборонного призначення, користувацька поведінка, машинне навчання, менеджмент інтерфейсу, класифікатори, аналітична підтримка рішень.

I. P. SINITSYN

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Director  
Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-4120-0784

S. V. ZADVORNYI

Postgraduate Student  
Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0009-0007-8788-3916

O. P. ILINA

PhD (Phys. -Math.), Senior Researcher

Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID: 0000-0002-3111-9310

## MODELS AND METHODS FOR SUPPORTING USER-CENTERED INTERFACE DESIGN OF DEFENSE INFORMATION SYSTEMS USING MACHINE LEARNING

*This paper presents an extended scientific and methodological framework for developing and maintaining user-centered interface design in defense information systems. The proposed approach integrates conceptual modeling, formal representation of interface services, behavioral observation data, and machine learning methods to improve the quality, stability, and predictability of interface performance in mission-critical environments. The relevance of the study stems from the need to ensure consistent usability and operational reliability under rapidly changing mission objectives, diverse user roles, and increased requirements for task accuracy and speed. The paper introduces a multilayer conceptual model that describes the structure of interface services, the parameters of their implementation, their influence on key performance indicators (KPIs), and the role of user behavior characteristics in achieving those indicators. A generalized classification of interface service parameters is proposed, covering structural, functional, perceptual, and manipulative dimensions, as well as contextual conditions of use. Based on accumulated observation archives and cross-system comparisons, the study outlines methods for identifying critical characteristics that significantly affect the quality of interface support. To enhance decision-making across the system lifecycle, several machine learning techniques are proposed: prediction of KPI achievement depending on the selected implementation format; classification of potential interface requirement violations; assessment of the risks associated with insufficient or inconsistent requirements; and evaluation of reengineering or modernization activities. The resulting framework forms a unified data-driven analytical environment that supports design, audit, operational monitoring, and continuous improvement of defense system interfaces based on objective measurements, formal models, and reproducible analytical workflows.*

**Key words:** user interface, interface services, UCD, defense information systems, personalization, user behavior analytics, machine learning, lifecycle management, decision support.

### Постановка проблеми

Актуальність дослідження полягає у необхідності забезпечення стабільної ефективності користувацько-центричного інтерфейсу інформаційних систем оборонного призначення в умовах динамічних задач, високих вимог до точності операцій та зростаючій ролі аналітики користувацької поведінки. Провідною концепцією у сфері проектування інтерфейсів є користувацько-центричний дизайн (User-Centered Design, UCD) [1], що ставить у центр уваги зручність, доступність, результативність та адаптивність взаємодії. Цей підхід вимагає врахування реальних потреб, сценаріїв та поведінки користувачів на всіх етапах розроблення і експлуатації системи [2].

Успішність використання UCD-підходу у різних галузях підтримується наразі низкою сучасних практик і стандартів [3]:

- використанням UX-аналітики, поведінкових досліджень (user journey mapping, heatmaps), A/B тестування;
- застосуванням когнітивних моделей (GOMS, Fitts' Law) для оцінки навантаження;
- акцентом на персоналізацію (UX personalization) та адаптивні інтерфейси [4];
- впровадженням стандартів оцінки якості, зокрема ISO 9241-210 [5] (ефективність, результативність, задоволеність) та QUIM;

- застосуванням машинного навчання (ML for UX) з метою:
- побудови моделей для класифікації користувачів (novice/expert).
- генерації рекомендацій щодо інтерфейсних рішень;
- виявлення критичних патернів (затримки, помилкові дії, повторення).

Серед технологічних трендів розробки, використовуваних в інтересах UCD, слід відмітити:

- Data-Driven Design – аналіз даних взаємодії;
- Behavior-Centered Design – проектування на основі поведінкових шаблонів;
- Evidence-Based Design – прийняття рішень на основі емпіричних доказів;

Імплементация парадигми UCD до процесів створення та сталого супроводження інформаційних систем оборонного призначення (ІСОП) становить актуальну проблему та потребує врахування наступної низки особливостей:

- ключовим критерієм якості інтерфейсу є результативність використання за призначенням ІСОП, до якої він належить;
- існує de facto прийнята система функціональних класів ІСОП, для яких може бути визначено базовий набір функцій і ролей користувачів та пов'язаних із ними потреб інтерфейсної підтримки;
- суттєвою особливістю життєвого циклу систем є багаторазовий реінжиніринг, що включає актуалізацію функціональних можливостей та використання перспективних інструментально-технологічних підходів і засобів;

- частою потребою є підтримка прийняття рішень із вибору або адаптації національного рівня для доступних ІСОП, що використовуються в світовій оборонній практиці;
- має місце співіснування як сприятливих організаційних можливостей для системного накопичення та аналізу досвіду експлуатації ІСОП, так і системи спеціалізованих вимог та обмежень, насамперед пов'язаних із захистом інформації.

Кращі практики UCD у сферах навчання, медицини, CRM/ERP-систем, а також у високонавантажених моніторингових системах, демонструють важливість безпосереднього введення структурних та процесних характеристик предметної області до процедур прийняття проектних та експлуатаційних рішень (доменний аспект).

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У дослідженнях, присвячених користувацько-центричному дизайну та підтримці інтерфейсних рішень, значна увага приділяється методам збору та аналізу поведінкових даних, а також застосуванню машинного навчання для підвищення якості UX. У роботах [1–4] розглядаються підходи до персоналізації інтерфейсів та формалізації параметрів взаємодії користувачів, що дозволяють будувати адаптивні інтерфейси в інформаційних системах. Дослідження [5–7] узагальнюють сучасні ML-методи для класифікації та прогнозування поведінкових характеристик, які впливають на досяжність показників ефективності. Автори [8–10] підкреслюють важливість уніфікованих моделей опису інтерфейсних послуг та систематизації параметрів для підтримки рішень на етапах проектування та експлуатації. Існуючі роботи формують теоретичне підґрунтя, проте не забезпечують інтегрованого концептуального середовища для комплексної аналітики та управління життєвим циклом інтерфейсу в ІСОП, що обумовлює необхідність запропонованого підходу.

#### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є створення програмно-технологічних засобів комплексної підтримки UCD на всіх етапах життєвого циклу ІСОП, що ґрунтуються на єдиній концептуальній моделі для організації, використання та актуалізації знань і фактуальних інформаційних масивів у процесах менеджменту ІК.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

В дослідженні пропонується модель, що поєднує: доменну структуру інтерфейсно підтримуваних функцій ІСОП; спостереження за поведінкою користувача; накопичення та узагальнення досвіду; аналітику результативності й рекомендацій із менеджменту життєвого циклу.

Структура моделі знань  $KM(S)$  стосовно інтерфейсу ІСОП  $S$  має вигляд

$$KM(S) = (MIP, FM, OM, MLCM, RI), \quad (1)$$

де  $MIP$  – модель цільового призначення,  $FM$  – функціональна модель інтерфейсу,  $OM$  – модель спостережень за використанням інтерфейсу,  $MLCM$  – модель менеджменту життєвого циклу,  $RI$  – відношення взаємозв'язку між елементами різних моделей,

$$MIP = (ST, CHR, CHE, CHS, ME) \quad (2)$$

де  $ST$  – множина цільових задач,  $CHR$  – показники результативності цільового використання ІСОП,  $CHE$  – показники ефективності,  $CHS$  – показники стійкості,  $ME$  – методи оцінювання

$$FM = \left( \begin{array}{l} \{FS_i, AFU_i, \{IS_{ij}, KPI_{ij}, ACHQ_{ij}, AM_{ij}\} \\ \{FR_{ijk}, ADM_{ijk}\}_{k=1, \dots, K_{ij}} \}_{j=1, \dots, J_i} \}_{i=1, \dots, I} \end{array} \right) \quad (3)$$

де  $FS$  – функція ІСОП,  $AFU$  – ділові ролі користувачів функції,  $IS_{ij}$  – інтерфейсна послуга,  $KPI_{ij}$  – ключові показники ефективності,  $ACHQ_{ij}$  – актуальна характеристика користувацької поведінки,  $AM_{ij}$  – її метрика,  $FR_{ijk}$  – формат реалізації інтерфейсної послуги,  $ADM_{ijk}$  – рішення з управління розвитком інтерфейсної послуги в життєвому циклі ІСОП

$$(OP, \{OT_i, FU_i, \{CHQ_{ij}, M_{ij}\}_{j=1, \dots, J_i}, QT_i\}_{i=1, \dots, I}) \quad (4)$$

де  $OP$  – період спостережень,  $OT_i$  – виконувана користувачем цільова задача з (2),  $FU_i$  – ділова роль користувача,  $CHQ_{ij}$  та  $M_{ij}$  – характеристика користувацької поведінки та її метрика,  $QT$  – якість інтерфейсної підтримки задачі

$$MLCM = (\{E_i, \{DM_{ij}, ELI_{ij}, INF_{ij}, MSD_{ij}\}_{j=1, \dots, J_i}\}_{i=1, \dots, I}) \quad (5)$$

де  $E_i$  – етап життєвого циклу ІСОП,  $DM_{ij}$  – рішення з менеджменту інтерфейсу,  $INF_{ij}$  – інформаційний контекст підтримки процесу прийняття рішення,  $MSD_{ij}$  – використовувані методи.

Основним елементом, параметри якого є об'єктом прийняття рішень менеджменту ІК, є інтерфейсна послуга (ІП) з (3). Менеджмент ґрунтується на спостереженнях за використанням ІП в складі ІСОП та її аналогів, оперативно відображуваних у протоколах та довгостроково зберезуваних в архівах спостережень. Склад характеристик поведінки користувача залежить від типу ІП та формату її реалізації. Рекомендована множина була зафіксована в ході дослідження разом із базовими для ІСОП типами ІП, метриками характеристик і складом КРІ для ІП.

Основні види параметрів інформаційних послуг охарактеризовані в табл. 1 згідно з моделлю FM.

Таблиця 1

## Параметри інтерфейсних послуг

Формат	Параметр	Опис	Рівні	Перспективні заходи з менеджменту ІІІ
Таблиця	Структурна складність	Кількість колонок, вкладених структур	низька/середня/висока	При високій – приховати другорядні колонки
Таблиця	Інформаційна щільність	Кількість даних в одному рядку	низька/середня/висока	При високій – перейти у contrast-режим
Таблиця	Маніпульованість	Редагування, сортування, масові операції	низька/середня/висока	При низькій – додати кнопки швидких дій
Таблиця	Візуальна доступність	Контраст, читабельність	низька/оптимальна/підвищена	При низькій – збільшити шрифт/контраст
Таблиця	Динамічність оновлення	Частота оновлення даних	статична/періодична/реального часу	При реальному часі – додати індикатор оновлень
Форма введення	Когнітивне навантаження	Кількість полів, складність	низьке/середнє/високе	При високому – розбити на кроки
Форма введення	Підказковість	Наявність авто-підказок	слабка/достатня/посилена	Посилити при високій кількості помилок
Форма введення	Толерантність до помилок	Автовиправлення, валідація	низька/середня/висока	Підвищити при частих некоректних введеннях
Форма введення	Швидкість введення	Автозаповнення, шаблони	низька/середня/висока	Увімкнути автозаповнення для досвідчених користувачів
Форма введення	Інтерактивність	Динамічні підказки, стан поля	відсутня/контекстна/предиктивна	При високих повторних введеннях – предиктивні підказки
Список	Щільність списку	Кількість елементів на екран	низька/середня/висока	Висока – автоматично переходити у картковий режим
Список	Формат відображення	Текст/картки/іконки	базовий/комбінований/візуальний	Перемикати візуальний режим при потребі швидкого сканування
Список	Фільтрування	Наявність фільтрів	просте/комбіноване/інтелектуальне	Увімкнути рекомендаційні фільтри
Список	Пошук	Пошук по елементах	простий/розширений/семантичний	У разі довгих пошуків – пропонувати автопошук
Карта	Рівень деталізації	Деталізація об'єктів	низька/середня/висока	При високому – групувати маркери
Карта	Навантаження	Кількість шарів/маркерів	низьке/середнє/високе	При високому – кластеризація
Карта	Маніпулятивність	Дії: масштаб, виділення	низька/середня/висока	Додати малювання областей при високій потребі аналітики
Панель дій	Кількість опцій	Кнопки та функції	мала/середня/велика	При великій – групувати в меню
Панель дій	Пріоритетність	Акцент на важливих діях	низька/середня/висока	Високопріоритетні – виділяти кольором
Довідкове вікно	Інтенсивність контенту	Обсяг пояснення	короткі/середні/детальні	При перевантаженні – скоротити текст, додати FAQ
Довідкове вікно	Релевантність	Відповідність контенту ситуації	низька/середня/висока	Показувати контекстну довідку
Візуалізація процесу	Інформативність	Показ станів	низька/середня/висока	У разі затримок – додати ETA
Візуалізація процесу	Часова точність	Коректність відображення	умовна/наближена/точна	Збільшити деталізацію таймерів
Дерево	Глибина ієрархії	Рівень вкладеності	мала/середня/велика	Автозгортання глибоких гілок
Дерево	Контекстність	Показ сусідніх вузлів	низька/середня/висока	Показати контекст при навігації
Діалогове вікно	Примусовість	Блокувальність	низька/середня/висока	При високій – додати авто-закриття
Діалогове вікно	Кількість опцій	Варіанти вибору	1/2/3+	При 3+ – рекомендувати основний варіант

В дослідженні запропоновано процес аналітичної підтримки прийняття відповідних рішень на найбільш критичних стадіях в життєвому циклі ІСОП, що включає процедури з використанням методів машинного навчання на основі інформації, яка розміщується в таких елементах інформаційного середовища:

- паспорти ІСОП, що визначають їх функції та специфікації ІІІ з їх складу;
- архів спостережень, що містить дані про сеанси для різних ІСОП даного класу;
- протоколи спостережень-для сеансів за період, коли продовжується процес розв'язання цільової задачі (дані ще не перенесені до архіву);
- протоколи та архів заходів менеджменту;
- протоколи розв'язання цільових задач з використанням ІСОП (містять експертні оцінки ефективності, що надаються за регламентом стейкхолдерами з оргструктури збройних сил).

В табл. 2 охарактеризовані основні напрями підтримки прийняття рішень із менеджменту ІК на етапах життєвого циклу ІСОП та можливості їх підтримки за допомогою запропонованих моделей.

Таблиця 2

**Задачі та середовище процесу комплексної підтримки парадигми UCD**

Етап	Тематика рішень	Формовані опції та аргументи	Використовуваний концептуальний контекст	Методи та операції	Використовуваний інформаційний контекст
Проектування ІСОП	Склад елементів інтерфейсу	ІП на підтримку функцій ІСОП	КМ класу, КМ ІСОП – аналогів (в розрізі моделей МІР та FM)	Визначення ІСОП-аналогів за задачами і функціями. Проеціювання множини ІП, оптимальне за МЕ.МІР, для аналогів	Архів спостережень цільової ефективності ІСОП
	Формати реалізації ІП	Формати та параметри реалізації, пропонувані як перспективні	КМ класу та КМ аналогів (в розрізі FM, МІР, OM)	Добір форматів реалізації за багатокритеріальною оптимальністю (QT, OM та CHR.МІР) для актуальних ST.МІРПобудова і використання ML-моделі класифікації прийнятності формату реалізації ІП	Архіви спостережень цільової ефективності ІСОП та спостережень користувацької поведінки
	Вимоги до інтерфейсу	Оцінка ризиків несумісності та недостатності вимог, виставлених до КРІ проектно обраних ІП	КМ класу	Побудова і використання ML моделей прогнозу рівня досяжності КРІ ІП підтримки цільових задач в залежності від форматів та параметрів реалізації	Архіви спостережень для аналогів
	Вимоги до макету	Склад макету	КМ класу, КМ аналогів	ML – дослідження для виявлення ІП, критичних для цільової якості ІСОП	Архіви спостережень для аналогів
План спостережень за КП при дослідній експлуатації		КМ класу, КМ аналогів	ML – дослідження для виявлення складу множини характеристик КП, критичних для КРІ ІП та для якості розв’язання цільових задач	Архіви спостережень для аналогів	
Дослідна експлуатація макету	Оцінка результатів спостережень	Діагностовані порушення вимог до КРІ ІП	КМ ІСОП, план спостережень, MLCM. КМ для аналогів	Використання ML моделей:- Виявлення ІП, неблагополучних за наслідками для якості розв’язання цільових задач;- Прогнозу впливу характеристик КП на КРІ ІП	Протоколи спостережень КП та якості цільового використання ІСОПАрхіви спостережень для аналогівРетроспектива оцінок ефективності заходів із модернізації інтерфейсу для ІСОП-аналогів
Аудит ІСОП, що знаходиться в експлуатації	Відповідність інтерфейсу проектним вимогам	Діагностовані відхилення та оцінка їх критичності	КМ ІСОП, плани спостережень	ML – аналіз вразливості ІП та ризику впливів на якість цільового використання ІСОП	Архіви і протоколи спостережень за ІСОП та її аналогами на різних етапах життєвого циклуНормативні вимоги до КРІ ІП та показників якості цільового використання ІСОП
	Доцільність проведення заходів із реінжинірингу ІСОП	Оцінка критичності характеристик інтерфейсу за актуальних умов та зареєстрованих нових потреб	Базові та оновлені при здійсненні модернізацій версії КМ ІСОП та КМ класу	Використання ML – моделі класифікації перспективності виконання заходів реінжинірингу за заданих умов	Архіви і протоколи спостережень, ретроспектива оцінок ефективності заходів із модернізації інтерфейсу ІСОП аналогів

Найбільшу роль в побудові необхідних процедур машинного навчання відіграють методи класифікації [6], прогнозу [7] за умов невизначеності, виявлення аномальних ситуацій [8] та причинно-наслідкових зв’язків [9], а також моделі оптимізації інтерфейсу на основі поведінкових даних [11].

Набори основних даних для них формуються з результатів спостережень у вигляді масиву

$$\left\{ \left( TV_j, \{MCH_{ji}\}_{i=1, \dots, NCH}, \{MLF_{jk}\}_{k=1, \dots, KL} \right) \right\}_{j=1, \dots, MO}$$

де  $MO$  – число спостережень;  $TV$  – цільова змінна (мітка позитивності для результату вирішення цільової задачі ІСОП, в межах якої відбувався сеанс);  $MCH$  – значення метрики характеристики  $CH_i$  користувацької поведінки ( $i$ -та сигнальна ознака);  $NCH$  – число сигнальних ознак;  $MLF$  – значення метрики  $k$  – тої лагової ознаки (ідентифікатор ІІ, сеансу, цільової задачі тощо);  $KL$  – число лагових ознак.

Схема процесу подана на рис. 1.

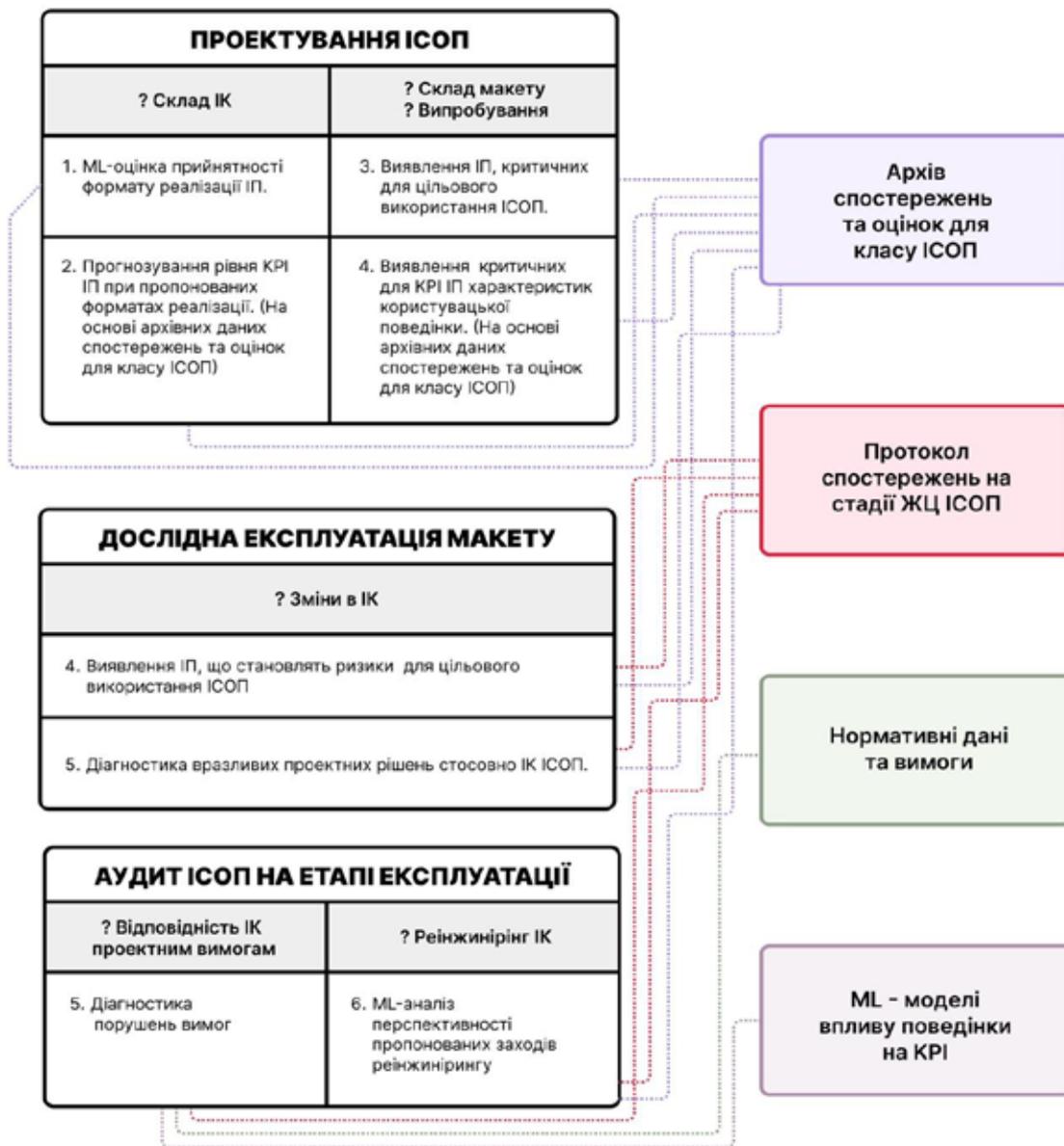


Рис. 1. Схема процесу

Джерело: розроблено авторами

### Висновки

В результаті проведеного дослідження були запропоновані:

- система концептуальних моделей, що визначає зв'язки між елементами інтерфейсу користувача ІСОП як із характеристиками ІСОП, так і з елементами спостережень за поведінкою користувача;
- структура та склад інформаційного середовища безперервної підтримки парадигми UCD на основі такої системи моделей;
- процедури аналітичної підтримки прийняття рішень із менеджменту інтерфейсу, ґрунтовані на використанні такого інформаційного середовища для машинного навчання моделей, що служать конструктивним поданням певних зв'язків зі складу концептуальних моделей.

Наразі виконується параметризація моделей інтерфейсу та постановок задач машинного навчання для класу ІСОП Управління оборонними ресурсами, а також проектування програмних засобів інформаційно-аналітичної підтримки використання даних про поведінку користувачів для цієї предметної області.

Подальші дослідження передбачають розширення формалізації параметрів інтерфейсних послуг для різних типів ІСОП, удосконалення методів побудови ознак для задач машинного навчання та розроблення прототипів аналітичних засобів, що підтримують автоматизовану адаптацію інтерфейсу. Перспективним є створення уніфікованого репозиторію поведінкових даних, який забезпечить можливість порівняльного аналізу між системами та підвищить точність прогнозних моделей. Okремо планується інтеграція сценарного моделювання і багатокритеріальної оптимізації для обґрунтування рішень щодо реінжинірингу інтерфейсних послуг.

#### Список використаної літератури

1. Gould J. D., Lewis C. Designing for usability: key principles and what designers think. *Communications of the ACM*. 1985. Vol. 28, No. 3. P. 300–311. DOI: <https://doi.org/10.1145/3166.3170>
2. Norman D. A., Draper S. W. (eds.). *User centered system design: new perspectives on human-computer interaction*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 1986.
3. Mao J.-Y., Vredenburg K., Smith P. W., Carey T. The state of user-centered design practice. *Communications of the ACM*. 2005. Vol. 48, No. 3. P. 105–109. DOI: <https://doi.org/10.1145/1047671.1047677>
4. Jameson A. Adaptive interfaces and systems. In: Jacko J.A. (ed.) *The Human–Computer Interaction Handbook*. Boca Raton : CRC Press, 2014. P. 305–330
5. International Organization for Standardization. ISO 9241-210:2019 – Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centred design for interactive systems. Geneva : ISO, 2019.
6. Fernández-Delgado M., Cernadas E., Barro S., Amorim D. Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? *Journal of Machine Learning Research*. 2014. Vol. 15. P. 3133–3181.
7. McElreath R. *Statistical rethinking: a bayesian course with examples in R and Stan* (2nd ed.). New York : Chapman and Hall/CRC, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429029608>
8. Hariri S., Carrasco Kind M., Brunner R. J. Extended Isolation Forest. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2021. Vol. 33, No. 4. P. 1479–1490. DOI: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2947676>
8. Wager S., Athey S. Estimation and inference of heterogeneous treatment effects using random forests. *Journal of the American Statistical Association*. 2018. Vol. 113, No. 523. P. 1228–1242. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.2017.1319839>
10. Oulasvirta A., Reichel A. *Computational Interaction*. Oxford : Oxford University Press, 2022.
11. Chen X., Wu W. User behavior modeling for interface optimization based on machine learning. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 107382–107395. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2999564>

#### References

1. Gould, J. D., & Lewis, C. (1985). Designing for usability: Key principles and what designers think. *Communications of the ACM*, 28(3), 300–311. <https://doi.org/10.1145/3166.3170>
2. Norman, D. A., & Draper, S. W. (Eds.). (1986). *User centered system design: New perspectives on human-computer interaction*. Lawrence Erlbaum Associates.
3. Mao, J.-Y., Vredenburg, K., Smith, P. W., & Carey, T. (2005). The state of user-centered design practice. *Communications of the ACM*, 48(3), 105–109. <https://doi.org/10.1145/1047671.1047677>
4. Jameson, A. (2014). Adaptive interfaces and systems. In J. A. Jacko (Ed.) *The Human–Computer Interaction Handbook* (pp. 305–330). CRC Press.
5. International Organization for Standardization. (2019). *ISO 9241-210:2019 – Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centred design for interactive systems*. ISO.
6. Fernández-Delgado, M., Cernadas, E., Barro, S., & Amorim, D. (2014). Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? *Journal of Machine Learning Research*, 15, 3133–3181.
7. McElreath, R. (2020). *Statistical rethinking: a Bayesian course with examples in R and Stan* (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429029608>
8. Hariri, S., Carrasco Kind, M., & Brunner, R. J. (2021). Extended isolation forest. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 33(4), 1479–1490. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2947676>
9. Wager, S., & Athey, S. (2018). Estimation and inference of heterogeneous treatment effects using random forests. *Journal of the American Statistical Association*, 113(523), 1228–1242. <https://doi.org/10.1080/01621459.2017.1319839>
10. Oulasvirta, A., & Reichel, A. (2022). *Computational interaction*. Oxford University Press.
11. Chen, X., & Wu, W. (2020). User behavior modeling for interface optimization based on machine learning. *IEEE Access*, 8, 107382–107395 <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2999564>

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.11.2025  
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 18.12.2025  
Дата публікації: 31.12.2025