УДК 004.89:519.87 **DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-087-099**
UDC 004.89:519.87

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ КРИТИЧНО ВАЖЛИВИМИ ОБ'ЄКТАМИ

MATHEMATICAL MODEL OF INTELLECTUALIZATION OF COMPUTER CONTROL SYSTEMS FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS

Ткачук Микола Сергійович, *аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту Національного транспортного університету, Київ, Україна, e-mail: kt20@ukr.net, тел. +380965409623,*

https://orcid.org/0000-0002-9683-4303

Чечуга Олександр Сергійович, *кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: chechuga77@gmail.com, тел. +380662019442*

https://orcid.org/0000-0003-1643-6354

Анотація. У статті досліджено теоретичні, алгоритмічні та структурні засади побудови інтелектуальних комп'ютерних систем управління, призначених для функціонування на критично важливих об'єктах із підвищеними вимогами до надійності та безпеки. Актуальність теми зумовлена ускладненням сучасних технічних і транспортних систем, зростанням обсягів різнорідної інформації, що обробляється у реальному масштабі часу, а також необхідністю мінімізації операторського ризику в умовах невизначеності, неповноти та суперечливості даних. У таких умовах традиційні детерміновані алгоритми обробки інформації виявляються недостатніми, що обумовлює потребу у формалізованому підході до інтелектуалізації комп'ютерних систем управління.

Запропоновано математичну модель інтелектуалізації комп'ютерних систем управління, яка передбачає поетапний перехід від інформаційного та аналітичного рівнів до інтелектуально-орієнтованого та адаптивно-інтелектуального рівнів функціонування. У межах запропонованого підходу введено формалізацію базового та залишкового ризику операторської помилки як функціональної залежності між початковою ймовірністю помилки та ефективністю інтелектуального супроводу. Розроблено аналітичні моделі зниження ризику для різних рівнів інтелектуалізації, включаючи лінійні, поліноміальні та логістичні залежності, що відображають якісну зміну механізму компенсації ризику.

Показано, що адаптивно-інтелектуальний рівень, реалізований із використанням методів штучного інтелекту, машинного навчання та контекстного аналізу, забезпечує нелінійне та порогове керування інтенсивністю інтелектуального супроводу. Такий підхід дозволяє мінімізувати залишковий ризик без порушення принципу «людина в контурі управління» та забезпечити узгодженість автоматизованого аналізу з експертною оцінкою оператора. Запропонована модель створює теоретичне підґрунтя для розроблення адаптивних систем підтримки прийняття рішень і може бути використана при проектуванні інтелектуальних комп'ютерних систем управління у галузях із підвищеними вимогами до безпеки, надійності та адаптивності обчислювальних процесів.

Ключові слова: інтелектуальні комп'ютерні системи, алгоритм, математична модель, інформація, методи, надійність, інтелектуалізація, архітектура, штучний інтелект, безпека, обробка даних, база знань.

Вступ. Сучасні критично важливі об'єкти інфраструктури характеризуються високою складністю структури, динамічністю процесів та наявністю невизначеності різної природи. Управління такими об'єктами здійснюється за допомогою комп'ютерних систем, які інтегрують засоби збору, обробки та аналізу даних у реальному масштабі часу. Зі зростанням обсягів інформації та інтенсивності потоків даних зростає когнітивне навантаження на оператора, що безпосередньо впливає на ймовірність прийняття помилкових рішень [1].

Традиційні інформаційні системи, орієнтовані переважно на візуалізацію та реєстрацію параметрів, не забезпечують достатнього рівня підтримки прийняття рішень у складних і слабкоструктурованих ситуаціях. У сучасних дослідженнях підкреслюється необхідність переходу від обробки даних до використання знань і адаптивних алгоритмів аналізу ситуацій [1].

У зв'язку з цим актуалізується проблема розроблення інтелектуальних комп'ютерних систем, здатних здійснювати контекстний аналіз, прогнозування розвитку подій та формування рекомендацій у режимі реального часу.

Актуальність теми. Сучасні критично важливі об'єкти інфраструктури функціонують в умовах високої складності, багатофакторної невизначеності та жорстких вимог до надійності управління. Зростання обсягів даних, підвищення швидкості технологічних процесів та інтеграція розподілених інформаційних систем призводять до суттєвого ускладнення задач оперативного прийняття рішень. У таких умовах традиційні комп'ютерні системи, орієнтовані на детерміновану обробку інформації, виявляються недостатніми для забезпечення необхідного рівня безпеки та ефективності.

Особливої ваги набуває проблема зниження операторського ризику, що виникає внаслідок когнітивного перевантаження, дефіциту часу та неповноти інформації. З огляду на це актуалізується потреба у створенні інтелектуальних комп'ютерних систем управління, здатних не лише обробляти дані, а й здійснювати контекстний аналіз ситуацій, прогнозувати розвиток подій та адаптувати алгоритми функціонування відповідно до змін середовища.

З позицій комп'ютерних наук інтелектуалізація систем управління пов'язана з впровадженням адаптивних алгоритмів, методів машинного навчання, моделей знань та механізмів роботи з невизначеністю. Проте ефективність таких систем повинна оцінюватися не лише за точністю прогнозування чи швидкодією, а й за їх здатністю зменшувати залишковий ризик прийняття помилкових рішень при збереженні принципу провідної ролі людини в контурі управління [2,3].

Таким чином, розроблення формалізованої математичної моделі інтелектуалізації комп'ютерних систем управління та визначення алгоритмічних вимог до їх побудови є актуальним науковим завданням, що має як теоретичне значення для розвитку інтелектуальних обчислювальних систем, так і практичну важливість для забезпечення надійності функціонування критично важливих об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних роботах з інтелектуальних комп'ютерних систем [4,5] значна увага приділяється методам машинного навчання, глибинним нейронним мережам, нечіткій логіці, експертним системам та гібридним алгоритмам. Дослідження в галузі систем підтримки прийняття рішень акцентують увагу на інтеграції різнорідних даних, побудові моделей знань та реалізації механізмів логічного виведення.

Окремий напрям становлять роботи з адаптивного управління та цифрових двійників складних технічних систем, у яких використовуються прогнозні моделі та методи оптимізації в реальному часі [6]. Водночас більшість публікацій орієнтована або на прикладні аспекти впровадження інтелектуальних компонентів, або на розроблення окремих алгоритмів, без узагальненої системної інтерпретації рівнів інтелектуалізації та їх впливу на показники безпеки.

Недостатньо дослідженим залишається питання побудови універсальної функціональної залежності, що описує зменшення залишкового ризику внаслідок застосування інтелектуального супроводу різних рівнів складності. Відсутність такої моделі ускладнює формування формалізованих вимог до архітектури та алгоритмічного забезпечення інтелектуальних комп'ютерних систем [7].

Мета і завдання роботи. Метою роботи є розроблення математичної моделі інтелектуалізації комп'ютерних систем управління критично важливими об'єктами та обґрунтування алгоритмічних вимог до адаптивно-інтелектуальної архітектури з урахуванням зниження операторського ризику.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати еволюцію комп'ютерних систем управління та виокремити рівні їх інтелектуалізації.
2. Запропонувати формалізовану модель базового та залишкового ризику операторської помилки.
3. Розробити аналітичні залежності зниження ризику для різних рівнів інтелектуалізації.
4. Обґрунтувати алгоритмічні та архітектурні вимоги до адаптивно-інтелектуальної системи управління.

Матеріали й методи. У роботі використано теоретичні положення інтелектуалізації комп'ютерних систем управління, підходи до формалізації операторського ризику та методи математичного моделювання нелінійних процесів. Дослідження ґрунтується на системному аналізі еволюції комп'ютерних систем управління та узагальненні їх функціональних можливостей залежно від рівня алгоритмічної складності та адаптивності.

Об'єктом дослідження є процес інтелектуального супроводу прийняття рішень у комп'ютерних системах управління критично важливими об'єктами. Предметом дослідження виступають математичні моделі зниження залишкового ризику операторської помилки та алгоритмічні механізми їх реалізації в адаптивно-інтелектуальних системах.

Методологічною основою роботи є системний підхід, який дозволив розглянути комп'ютерну систему управління як інтегровану структуру взаємопов'язаних алгоритмів і моделей. Для формалізації впливу інтелектуального супроводу на показники надійності застосовано методи математичного моделювання, зокрема побудову функціональних залежностей між базовим та залишковим ризиком. Інтерпретація базового ризику здійснювалася з використанням елементів теорії ймовірностей.

Для опису різних рівнів інтелектуалізації використано методи аналітичної апроксимації, що дозволило сформувати лінійні, поліноміальні та логістичні моделі зниження ризику. Обґрунтування адаптивно-інтелектуального рівня виконано на основі аналізу нелінійних залежностей та механізмів параметричної адаптації, які забезпечують динамічне оновлення моделей відповідно до зміни вхідних даних.

Застосування зазначених методів дозволило забезпечити узгодженість між теоретичною моделлю зниження ризику та структурними вимогами до побудови адаптивно-інтелектуальної комп'ютерної системи управління.

Виклад основного матеріалу.

1. Рівні інтелектуалізації комп'ютерних систем

Інтелектуалізація комп'ютерних систем управління розглядається як закономірний етап їх еволюційного розвитку, що відображає перехід від традиційної автоматизованої обробки даних до використання моделей знань, адаптивних алгоритмів та механізмів контекстного аналізу. На відміну від інформатизації, яка була орієнтована переважно на підвищення швидкості обробки та доступності інформації, інтелектуалізація пов'язана із залученням комп'ютерної системи до процесів аналізу, інтерпретації та підтримки прийняття рішень.

У загальному випадку комп'ютерна система управління може виконувати різні функціональні ролі: від інструмента реєстрації та відображення даних до активного учасника процесу формування управлінських рішень. Саме ступінь цієї участі визначає рівень інтелектуалізації системи. Чим більшу частину аналітичних, прогностичних та інтерпретаційних функцій бере на себе комп'ютерна система, тим вищим є її інтелектуальний рівень .

З позицій комп'ютерних наук інтелектуалізація передбачає зміну характеру алгоритмічного забезпечення. Якщо на початкових етапах системи базуються на жорстко детермінованих процедурах обробки даних, то подальший розвиток пов'язаний із впровадженням статистичних моделей, методів оптимізації, механізмів логічного виведення, а згодом – адаптивних алгоритмів та методів машинного навчання. Така еволюція відображає перехід від статичних програмних рішень до динамічних обчислювальних моделей, здатних змінювати власні параметри залежно від умов функціонування.

Особливого значення інтелектуалізація набуває в системах управління критично важливими об'єктами, де помилка оператора може мати суттєві наслідки [8]. У таких умовах комп'ютерна система повинна не лише надавати інформацію, але й сприяти зменшенню невизначеності, виявляти потенційно небезпечні ситуації, прогнозувати розвиток подій та формувати обґрунтовані рекомендації. Водночас повна автономізація управління є небажаною або неприпустимою, що обумовлює необхідність збереження принципу «людина в контурі».

Таким чином, інтелектуалізація може бути інтерпретована як процес поступового підвищення здатності комп'ютерної системи:

- інтегрувати різнорідні інформаційні потоки;
- працювати з невизначеністю та неповнотою даних;
- використовувати накопичений досвід у вигляді формалізованих знань;
- адаптувати алгоритмічні механізми до зміни умов;
- зменшувати залишковий ризик операторської помилки.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика рівнів інтелектуалізації комп'ютерних систем управління

Table 1 – Comparative Characteristics of the Levels of Intellectualization of Computer Control Systems

Характеристика	**Інформаційний рівень**	**Аналітичний рівень**	**Інтелектуально-орієнтований рівень**	**Адаптивно-інтелектуальний рівень**
Основна функція	Моніторинг та відображення	Аналіз і формування альтернатив	Інтерпретація та обґрунтування	Адаптивне прогнозування та супровід
Тип алгоритмів	Детерміновані процедури	Статистичні та оптимізаційні методи	Моделі знань, логічне виведення	Машинне навчання, гібридні моделі
Робота з невизначеністю	Практично відсутня	Часткова	Формалізована	Динамічна та контекстна
Здатність до адаптації	Відсутня	Обмежена	Часткова	Повноцінна
Роль оператора	Повне прийняття рішень	Остаточний вибір альтернатив	Контроль і оцінювання рекомендацій	Контроль і корекція адаптивних рішень

При цьому важливо підкреслити, що інтелектуалізація не зводиться лише до впровадження окремих методів штучного інтелекту. Йдеться про системну зміну архітектури комп'ютерної системи, структури програмного забезпечення та логіки взаємодії з оператором. Підвищення рівня інтелектуалізації супроводжується переходом від реактивної моделі функціонування до прогностично-адаптивної, що забезпечує якісну зміну характеру підтримки прийняття рішень [9].

Для більш чіткої структуризації зазначеного процесу доцільно виділити рівні інтелектуалізації комп'ютерних систем управління, які відображають ступінь складності алгоритмічного забезпечення, глибину використання моделей знань та характер взаємодії з людиною-оператором (табл.1).

Запропонована градація дозволяє систематизувати підходи до проектування інтелектуальних комп'ютерних систем та створює підґрунтя для подальшої формалізації їх впливу на показники надійності та безпеки управління.

1. Формалізована модель інтелектуалізації комп'ютерної системи управління

Інтелектуалізація комп'ютерних систем управління розглядається як поетапний процес підвищення ступеня участі обчислювальних алгоритмів у формуванні управлінських рішень. Формально рівень інтелектуалізації можна трактувати як функціональну здатність системи зменшувати невизначеність та операторський ризик шляхом обробки даних, використання знань та адаптації моделей [10,11].

Для формалізації введемо узагальнену модель комп'ютерної системи управління у вигляді трійки:

$$S = \langle D, A, M \rangle, \tag{1}$$

де D – множина вхідних даних;

A – множина алгоритмів обробки;

M – множина моделей (статистичних, логічних, прогностичних).

У такому поданні рівень інтелектуалізації визначається:

– складністю алгоритмічної множини A;

– глибиною та формалізованістю моделей M;

– наявністю механізмів адаптації параметрів моделей;

– характером взаємодії системи з оператором.

Таким чином, інтелектуалізація пов'язана не лише з розширенням множини алгоритмів, а й зі зміною їх внутрішньої структури та способу використання моделей знань.

1.1 Інформаційний рівень

На інформаційному рівні система виконує функції збору, зберігання, фільтрації та візуалізації даних. Формально:

$$A_1 = \left\{ a_i : D \to D' \right\}; \tag{2}$$

де алгоритми реалізують детерміновані перетворення даних без їх контекстної інтерпретації.

Множина моделей M_1 або відсутня, або є статичною. Система не змінює структуру алгоритмів залежно від ситуації. Її вплив на зниження невизначеності опосередкований та пов'язаний виключно з покращенням доступності інформації.

1.2 Аналітичний рівень

Аналітичний рівень характеризується впровадженням статистичних та оптимізаційних алгоритмів:

$$A_2 = \{ a_i : D \to Y \}, \tag{3}$$

де Y – множина альтернатив управлінських рішень.

Множина моделей M_2 включає:

–регресійні залежності,
–методи кластеризації,
–критерії оптимізації.

Система формує альтернативи рішень, однак параметри моделей є фіксованими, а механізми самонавчання відсутні.

1.3 Інтелектуально-орієнтований рівень

На цьому рівні множина моделей набуває структури:

$$M_3 = \{K, R, I\}, \tag{4}$$

де K – база знань; R – правила логічного виведення; I – механізм інтерпретації.

Система здатна враховувати контекст ситуації та пояснювати сформовані рекомендації. Обробка інформації переходить від статистичної до семантичної. Проте параметри знань залишаються відносно стабільними.

1.4 Адаптивно-інтелектуальний рівень

Найвищий рівень інтелектуалізації передбачає наявність механізму динамічної адаптації параметрів моделей:

$$\theta_t + 1 = \theta_t + \Delta\theta(D_t); \tag{5}$$

де θ – вектор параметрів моделі; D_t – поточні дані.

Адаптація може здійснюватися за допомогою градієнтних методів оптимізації, байєсівського оновлення, алгоритмів підкріплювального навчання, гібридних інтелектуальних механізмів.

На цьому рівні множина алгоритмів A стає динамічною, а система здатна змінювати власну поведінку залежно від середовища функціонування. Відбувається перехід від статичної обробки інформації до динамічного моделювання поведінки об’єкта управління.

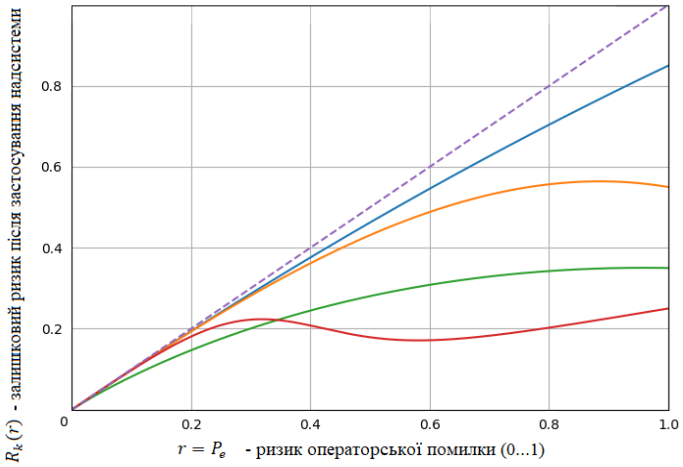

Рисунок 1 – Порівняльний графік залежностей залишкового ризику операторської помилки
Figure 1 – Comparative Graph of Residual Operator Error Risk Dependencies

Отримана формалізація дозволяє пов'язати рівень інтелектуалізації зі здатністю системи зменшувати залишковий ризик операторської помилки. Подальший аналіз буде спрямований на побудову математичної моделі, що встановлює функціональну залежність між рівнем інтелектуалізації та величиною залишкового ризику.

2. Математична модель впливу рівня інтелектуалізації з ризиком операторської помилки.

З огляду на те, що основною метою інтелектуалізації є підвищення надійності діяльності людини-оператора, доцільно пов'язати рівні інтелектуалізації з ризиком операторської помилки, у вигляді імовірності P_e. Порівняльний графік функцій залишкового ризику операторської помилки наведено на рис. 1.

Нехай $r = P_e \in [0,1]$ – базовий ризик операторської помилки за відсутності інтелектуального супроводу. Вибір інтервалу $[0;1]$ для обох осей забезпечує інваріантність аналізу до предметної області та дозволяє зосередитися на структурних відмінностях між функціональними залежностями.

Для кількісного порівняння рівнів введемо функцію $m_k(r)$, що описує частку ризику, яку вдається зменшити завдяки інтелектуальному супроводу k-го рівня. Тоді залишковий ризик після застосування надсистеми визначається як вираз (6):

$$R_k(r) = r(1 - m_k(r)). \tag{6}$$

Зі зростанням рівня інтелектуалізації форма залежності ускладняється, а залишковий ризик операторської помилки зменшується. Пунктирна залежність $R = r$ задає еталонну траєкторію ризику за відсутності інтелектуального супроводу і слугує базою для оцінювання ефективності різних режимів інтелектуалізації. Розташування всіх інших кривих нижче цієї лінії вказує на систематичне зменшення залишкового ризику внаслідок залучення комп'ютерної надсистеми інтелектуального супроводу.

Перша крива – інформаційного рівня характеризується наближеністю до лінійної форми, що свідчить про обмежений компенсуючий ефект інтелектуального супроводу. Така залежність відповідає режиму, за якого система виконує переважно інформаційні функції та лише опосередковано впливає на когнітивні процеси оператора. Для інформаційного рівня зниження ризику має майже лінійний характер:

$$\begin{aligned} m_1(r) &= \alpha_1 r, \alpha_1 \approx 1, \\ R_1(r) &= r(1 - \alpha_1 r). \end{aligned} \tag{7}$$

Ця залежність відповідає кривій на рис. 1, що лише не суттєво відхиляється від базового ризику.

Друга крива – аналітичного рівня демонструє нелінійну поведінку з посиленням ефекту зниження ризику при зростанні r. Це відображає специфіку аналітичних методів, ефективність яких суттєво зростає лише після досягнення певного рівня складності ситуації, коли накопичується достатній обсяг даних для їх коректного застосування. Для аналітичного рівня ефект супроводу зростає зі збільшенням складності ситуації:

$$\begin{aligned} m_2(r) &= \alpha_2 r + \beta_2 r^2, \\ R_2(r) &= r(1 - \alpha_2 r - \beta_2 r^2). \end{aligned} \tag{8}$$

На рис. 1 ця крива демонструє помітне зниження ризику лише при великих значеннях r.

Третя крива – інтелектуально-орієнтованого рівня характеризується вираженою чутливістю до середніх значень r, що вказує на принципово інший механізм зниження ризику. Використання знань, правил та контекстної інтерпретації дозволяє системі зменшувати ймовірність помилки оператора навіть у ситуаціях, які ще не досягли критичного рівня небезпеки, але вже потребують когнітивної підтримки. Для інтелектуально-орієнтованого рівня характерною є підвищена чутливість до середніх значень ризику:

$$m_3(r) = \alpha_3 r + \beta_3 \sqrt{r},$$
$$R_3(r) = r(1 - \alpha_3 r - \beta_3 \sqrt{r}). \quad (9)$$

Відповідна крива на рис. 1 суттєво нижча за $R_1(r)$ та $R_2(r)$ у середньому діапазоні значень r.

Четверта крива – адаптивно-інтелектуального рівня має адаптивний характер і форму, близьку до порогової. Наявність локального мінімуму в області середніх значень r свідчить про те, що інтенсивність інтелектуального супроводу змінюється залежно від складності ситуації. У зоні зростаючої невизначеності система переходить у режим максимальної чутливості, забезпечуючи найсуттєвіше зниження залишкового ризику. При цьому за малих значень r вплив супроводу є мінімальним, що запобігає надмірному втручанню в діяльність оператора, а за великих значень r зберігається ненульовий залишковий ризик, що відповідає принципу «людина в контурі». Для адаптивно-інтелектуального рівня зниження ризику описується логістичною залежністю:

$$m_4(r) = \gamma \frac{1}{1 + e^{-k(r - r_0)}}, 0 < \gamma < 1,$$
$$R_4(r) = r(1 - \gamma \frac{1}{1 + e^{-k(r - r_0)}}). \quad (10)$$

Параметр r_0 визначає поріг переходу до інтенсивного інтелектуального супроводу, а коефіцієнт γ відображає обмеження автономності системи відповідно до принципу «людина в контурі».

Аналіз графіка показує, що підвищення рівня інтелектуалізації супроводжується не просто кількісним зменшенням залишкового ризику операторської помилки, а якісною зміною характеру залежності $R_k(r)$. Перехід від майже лінійних до адаптивних нелінійних функцій відображає зміну ролі комп'ютерної системи – від пасивного джерела інформації до активного інтелектуального суб'єкта взаємодії з оператором, здатного динамічно підтримувати процес прийняття рішень у критичних умовах.

Отримані результати підтверджують, що саме адаптивно-інтелектуальний рівень є найбільш обґрунтованим для реалізації комп'ютерних надсистем інтелектуального супроводу в системах управління складними та критично важливими технічними об'єктами, оскільки він забезпечує мінімізацію залишкового ризику без порушення принципу пріоритету людини в управлінні.

Нижчі рівні інтелектуалізації комп'ютерних систем управління не в повній мірі забезпечують вимоги до надсистем інтелектуального супроводу:

– інформаційний рівень обмежується візуалізацією та моніторингом і не здатний підтримувати когнітивні процеси оператора;

– аналітичний рівень формує альтернативи, але не працює з невизначеністю, конфліктною інформацією та накопиченим досвідом;

– інтелектуально-орієнтований рівень є необхідним базисом, однак без адаптації не забезпечує ефективного супроводу в умовах змінної обстановки та деградації інформації.

Адаптивно-інтелектуальний рівень дозволяє реалізувати ключові функції надсистеми інтелектуального супроводу:

– інтеграцію різнорідних потоків даних та подій;
– контекстний аналіз ситуацій і прогноз їх розвитку;
– адаптацію рекомендацій до поточного стану об’єкта та чергового персоналу;
– накопичення та використання експлуатаційного досвіду;
– зниження когнітивного навантаження на людину.

При цьому принципово важливо, що прийняття остаточного рішення залишається за черговим персоналом, а система виконує функції інтелектуального радника, а не автономного керуючого агента.

3. Архітектурна модель адаптивно-інтелектуальної системи

Запропонована архітектурна модель адаптивно-інтелектуальної комп’ютерної системи управління (рис.2) відображає перехід від традиційної ієрархічної структури обробки даних до багаторівневої інтегрованої системи з механізмами прогнозування, адаптації та зворотного зв’язку. Її побудова ґрунтується на необхідності забезпечення безперервного аналізу стану об’єкта, оцінювання ризику, формування рекомендацій та динамічного коригування алгоритмів відповідно до зміни умов функціонування.

Рисунок 2 – Архітектурна модель адаптивно-інтелектуальної компютерної системи управління
Figure 2 – Architectural Model of an Adaptive-Intelligent Computer Control System

На початковому рівні формується єдиний інформаційний простір системи. Дані, що надходять із різнорідних джерел, проходять процедури узгодження, синхронізації та попереднього очищення. Це дозволяє забезпечити коректність подальшого аналітичного опрацювання та усунути вплив випадкових шумів і неточностей вимірювань. Таким чином створюється структурована база для побудови внутрішньої моделі стану об'єкта управління

Наступний рівень пов'язаний з оцінюванням поточного стану системи. На основі інтегрованих даних формується узагальнена модель, що відображає актуальні параметри функціонування об'єкта. Саме на цьому етапі здійснюється оцінювання базового ризику операторської помилки та виявлення аномальних режимів роботи. Отримана оцінка ризику виступає ключовим параметром для подальших інтелектуальних процедур [12].

Прогностичний рівень забезпечує аналіз можливих сценаріїв розвитку ситуації. Застосування моделей прогнозування дозволяє не лише зафіксувати поточний стан, а й передбачити його зміну у часовій перспективі. Формується множина альтернатив управлінських рішень, кожна з яких оцінюється з позицій впливу на залишковий ризик. Таким чином система переходить від реактивного до проактивного режиму функціонування.

Особливістю адаптивно-інтелектуальної архітектури є наявність рівня адаптації. На цьому етапі параметри моделей коригуються залежно від нових даних, результатів прогнозування та зворотного зв'язку. Адаптація забезпечує динамічну перебудову внутрішніх алгоритмів, що дозволяє системі зберігати ефективність навіть в умовах зміни характеристик об'єкта або деградації інформації. Саме цей механізм забезпечує реалізацію логістичної залежності зниження ризику, коли інтенсивність інтелектуального супроводу змінюється залежно від рівня невизначеності.

Верхній рівень архітектури пов'язаний із взаємодією з оператором. Система надає пояснення сформованих рекомендацій, відображає прогнозовані сценарії та дозволяє здійснювати корекцію рішень. Остаточне управлінське рішення залишається за людиною, що відповідає принципу «людина в контурі». Зворотний зв'язок від оператора впливає на механізм адаптації, формуючи замкнений контур інтелектуального супроводу.

Узагальнюючи, можна зазначити, що запропонована архітектура відображає якісну трансформацію комп'ютерної системи управління: від пасивного інструмента обробки інформації до активного адаптивного середовища підтримки прийняття рішень. Вона структурно узгоджується з математичною моделлю зниження залишкового ризику та забезпечує практичну реалізацію порогового механізму активації інтелектуального супроводу. Саме інтеграція прогнозування, адаптації та зворотного зв'язку формує основу для підвищення надійності управління критично важливими об'єктами.

Висновки. У статті досліджено підходи до формалізації вимог до інтелектуальних комп'ютерних систем управління критично важливими об'єктами з позицій зниження операторського ризику.

Проаналізовано еволюцію комп'ютерних систем управління та виокремлено чотири рівні їх інтелектуалізації. Показано, що підвищення рівня інтелектуалізації супроводжується переходом від детермінованої обробки даних до адаптивного прогнозно-аналітичного супроводу прийняття рішень.

Запропоновано формалізовану модель залишкового ризику операторської помилки у вигляді функціональної залежності, що дозволяє кількісно оцінювати ефективність інтелектуального супроводу. Розроблено аналітичні залежності зниження ризику для різних рівнів інтелектуалізації та обґрунтовано використання логістичної моделі для адаптивно-інтелектуального рівня.

Сформовано алгоритмічні та архітектурні вимоги до адаптивно-інтелектуальної системи, яку представлено у вигляді багаторівневої структури з адаптивним зворотним контуром.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у критично важливих об'єктах.

Перелік посилань

1. Moiseenko V., Kameniev O., Gaievskyi V. Predicting a technical condition of railway automation hardware under conditions of limited statistical data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. Vol. 3, № 9 (88). P. 26–35. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102005.
2. Holub H., Tkachuk M., Melenchuk V., Lushchai Y. A system model of decision-making transportation process management in transport infrastructure projects. *Transport Systems and Technologies*. 2023. № 40. P. 219–226. DOI: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-19.
3. Kulbovskyi I., Tkachuk M. Prospects of applying artificial intelligence in microprocessor systems for railway traffic control // Transport Means : Proceedings of the International Conference. 2024. P. 712–715.
4. Samsonkin V., Yurchenko O., Sorochynska O., Rohovyi O., Bureika G. Decarbonizing Strategy of Ukrainian Transport Sector. *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort.* ITSESQC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1335. Cham : Springer, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_10.
5. Сорока А., Голуб Г. М. Аналіз і прогнозування витрат у великих корпораціях: інтеграція сучасних аналітичних моделей. *Наука і техніка сьогодні.* 2025. № 11 (52). DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-2727-2741.
6. Голуб Г. М., Воронко І. О., Бачинський В., Корчовий В. Інтегрована оптимізація алгоритмів машинного навчання та хмарних ресурсів для обробки великих даних у транспортних системах. *Наука і техніка сьогодні.* 2025. № 11 (52). DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1990-2000.
7. Stasiuk A., Kuznetsov V., Goncharova L., Hubskyi P. Models of the computer intellectualization optimal strategy of the power supply fast-flowing technological processes of the railways traction substations. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina.* 2021. Vol. 23, № 2. P. 30–36. DOI: https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.C30-C36.
8. Panchenko N. The formation of the system of risk-management on railway transport of Ukraine. *Agrosvit.* 2018. № 22. P. 34. DOI: https://doi.org/10.32702/2306-6792.2018.22.34
9. Мойсеєнко В. І., Чегодаев Б. В., Зотова О. С. Методи діагностування систем залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2014. № 4. С. 26–32.
10. Sorochynska O., Melnichenko O., Kulbovskyi I., Tkachenko V. System model for the formation of organizational and technical processes for the prevention of emergency situations in transport complex projects. *Transport Systems and Technologies.* 2025. № 46. URL: https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/438.
11. Holub H., Kulbovskyi I., Skliarenko I., Bambura O., Tkachuk M. Research of methods for identification of emergency modes of power supply system in transport infrastructure projects. *Technology Audit and Production Reserves.* 2019. № 5/2 (49). P. 34–36. DOI: https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.182830.
12. Samsonkin V., Sotnyk V., Yurchenko O., Zmii S., Myronenko V., Soloviova O. Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2022. 6/3 (120). P. 32–43. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715.

MATHEMATICAL MODEL OF INTELLECTUALIZATION OF COMPUTER CONTROL SYSTEMS FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS

Tkachuk Mykola S., Postgraduate Student of the Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, Educational and Scientific Kyiv Institute of Railway Transport, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kt20@ukr.net, tel.: +380 96 540 9623, https://orcid.org/0000-0002-9683-4303

Chechuga Oleksandr S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: chechuga77@gmail.com, тел. +380662019442. https://orcid.org/0000-0003-1643-6354

Анотація. The paper investigates the theoretical, algorithmic, and structural foundations for the development of intelligent computer control systems intended for operation at critical infrastructure facilities with increased reliability and safety requirements. The relevance of the study is determined by the growing complexity of modern technical and transport systems, the increasing volume of heterogeneous data processed in real time, and the necessity to minimize operator risk under conditions of uncertainty, incompleteness, and inconsistency of information. Under such conditions, traditional deterministic data-processing algorithms prove insufficient, which necessitates a formalized approach to the intellectualization of computer control systems.

A mathematical model of the intellectualization of computer control systems is proposed, providing a staged transition from informational and analytical levels to knowledge-oriented and adaptive-intelligent levels of operation. Within the proposed framework, the baseline and residual operator error risks are formalized as a functional relationship between the initial probability of error and the efficiency of intelligent decision support. Analytical models for risk reduction at different levels of intellectualization are developed, including linear, polynomial, and logistic dependencies that reflect qualitative changes in the risk compensation mechanism.

It is demonstrated that the adaptive-intelligent level, implemented using artificial intelligence methods, machine learning techniques, and contextual analysis, ensures nonlinear and threshold-based regulation of decision-support intensity. This approach enables minimization of residual risk without violating the "human-in-the-loop" principle and ensures consistency between automated analysis and expert operator judgment. The proposed model provides a theoretical basis for the development of adaptive decision-support systems and can be applied in the design of intelligent computer control systems in domains with increased requirements for safety, reliability, and adaptability of computational processes.

Keywords: Intelligent computer systems, algorithm, mathematical model, information, methods, reliability, intellectualization, architecture, artificial intelligence, safety, data processing, knowledge base.

References

1. Moiseenko, V., Kameniev, O., & Gaievskyi, V. (2017). Predicting a technical condition of railway automation hardware under conditions of limited statistical data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(9(88)), 26–35. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102005

2. Holub, H., Tkachuk, M., Melenchuk, V., & Lushchai, Y. (2023). A system model of decision-making transportation process management in transport infrastructure projects. *Transport Systems and Technologies*, (40), 219–226. https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-19

3. Kulbovskyi, I., & Tkachuk, M. (2024). Prospects of applying artificial intelligence in microprocessor systems for railway traffic control. In Transport Means: *Proceedings of the International Conference (*pp. 712–715).

4. Samsonkin, V., Yurchenko, O., Sorochynska, O., Rohovyi, O., & Bureika, G. (2025). Decarbonizing strategy of Ukrainian transport sector. In O. Slavinska, V. Danchuk, O. Kunytska, & O. Hulchak (Eds.), *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort* (ITSESQC 2024) (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1335). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_10

5. Soroka, A., & Holub, H. M. (2025). Analiz i prohnozuvannia vytrat u velykykh korporatsiiakh: intehratsiia suchasnykh analitychnykh modelei (Analysis and forecasting of costs in large corporations: integration of modern analytical models). *Nauka i tekhnika sohodni*, 11(52). https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-2727-2741 [in Ukrainian]

6. Holub, H. M., Voronko, I. O., Bachynskyi, V., & Korchovyi, V. (2025). Intehrovana optymizatsiia alhorytmiv mashynnoho navchannia ta khmarnykh resursiv dlia obrobky velykykh danykh u transportnykh systemakh (Integrated optimization of machine learning algorithms and cloud resources for big data processing in transport systems). *Nauka i tekhnika sohodni*, 11(52). https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1990-2000 [in Ukrainian]

7. Stasiuk, A., Kuznetsov, V., Goncharova, L., & Hubskyi, P. (2021). Models of the computer intellectualization optimal strategy of the power supply fast-flowing technological processes of the railways traction substations. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 23(2), 30–36. https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.C30-C36

8. Panchenko, N. (2018). The formation of the system of risk-management on railway transport of Ukraine. *Agrosvit*, (22), 34. https://doi.org/10.32702/2306-6792.2018.22.34

9. Moiseienko, V. I., Chehodaev, B. V., & Zotova, O. S. (2014). Metody diahnostuvannia system zaliznychnoi avtomatyky (Methods of diagnostics of railway automation systems). *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (4), 26–32. [in Ukrainian]

10. Sorochynska, O., Melnichenko, O., Kulbovskyi, I., & Tkachenko, V. (2025). System model for the formation of organizational and technical processes for the prevention of emergency situations in transport complex projects. *Transport Systems and Technologies*, (46). Retrieved from https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/438

11. Holub, H., Kulbovskyi, I., Skliarenko, I., Bambura, O., & Tkachuk, M. (2019). Research of methods for identification of emergency modes of power supply system in transport infrastructure projects. *Technology Audit and Production Reserves*, 5/2(49), 34–36. https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.182830

12. Samsonkin, V., Sotnyk, V., Yurchenko, O., Zmii, S., Myronenko, V., & Soloviova, O. (2022). Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/3(120), 32–43. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715

Дата надходження до редакції 27.01.2026.
Дата прийняття статті після рецензування 20.02.2026.