

УДК 004.67

І.А. ІВАНОВ*

ПІДХІД ДО ЗМЕНШЕННЯ ЕНТРОПІЇ ІНФОРМАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ГАЗОВИДОБУВНИМ ПІДПРИЄМСТВОМ

*Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У статті запропоновано підхід до зменшення ентропії інформації управління газовидобувним підприємством в умовах зростаючої складності виробничих процесів, невизначеності інформації та обмеженості ресурсів. Це є особливо актуальним для сучасних газовидобувних підприємств в Україні, які потерпають від ворожих атак. При цьому зазначені підприємства є підприємствами критичної інфраструктури та потенційно-небезпечними об'єктами, що треба враховувати при побудові моделей управління, чутливих до ентропії. Інформацію управління запропоновано розглядати як динамічну систему, ентропія якої змінюється в часі під впливом неповноти даних, суперечностей між джерелами інформації та затримок у її надходженні. Запропоновано формалізований підхід до оцінювання ентропії інформаційного забезпечення управління, що базується на аналізі структурованості бази даних, актуальності інформаційних записів і відповідності інформації поточному стану виробничого процесу. Обґрунтовано доцільність інтеграції ентропійних критеріїв у процедури управління газовидобувним підприємством. Показано, що мінімізація ентропії інформації дозволяє зменшити управлінську невизначеність, підвищити обґрунтованість рішень та забезпечити своєчасний перехід від нештатних режимів функціонування до штатних без розвитку кризових і аварійних ситуацій. Особливу увагу приділено врахуванню часових характеристик інформації та їх впливу на рівень ентропії. Запропонований підхід може бути використаний при розробленні систем підтримки прийняття рішень, інформаційно-аналітичних систем та ситуаційних центрів управління газовидобувними підприємствами. Отримані результати створюють методологічне підґрунтя для підвищення ефективності управління виробничими процесами та зниження ризиків у газовидобувній галузі.

Ключові слова: алгоритм мінімізації впливу, інформаційна невизначеність, «дерево подій», критеріальна функція, множина ситуацій.

Abstract. The paper proposes an approach to reducing the entropy of management information at a gas production enterprise under conditions of increasing complexity of production processes, information uncertainty, and limited resources. This issue is particularly relevant for modern gas production enterprises in Ukraine, which are exposed to hostile attacks. At the same time, such enterprises belong to critical infrastructure facilities and are potentially hazardous objects, which should be taken into account when developing management models sensitive to information entropy. It is proposed to consider management information a dynamic system whose entropy changes over time due to data incompleteness, inconsistencies between information sources, and delays in information acquisition. A formalized approach to assessing the entropy of management information support is proposed, based on the analysis of database structure, the timeliness of information records, and the correspondence of information to the current state of the production process. The feasibility of integrating entropy-based criteria into the management procedures of a gas production enterprise is substantiated. It is shown that minimizing information entropy makes it possible to reduce managerial uncertainty, improve the justification of decisions, and ensure a timely transition from abnormal operating modes to normal ones without the development of crisis or emergency situations. Particular attention is paid to the temporal characteristics of information and their impact on entropy level. The proposed approach can be applied in the development of decision support systems, information and analytical systems, and situational control centers for gas production enterprises. The obtained results form a methodological basis for improving the efficiency of production process management and reducing risks in the gas production sector.

Keywords: impact minimization algorithm, information uncertainty, event tree, criterion function set of situations.

1. Вступ

Сучасні системи управління виробничими підприємствами функціонують в умовах зростаючої складності, інформаційної перевантаженості та високого рівня невизначеності зовнішнього середовища. Особливо гостро ці проблеми проявляються у стратегічних галузях економіки, де помилки управлінських рішень мають не лише економічні, а й соціальні та безпекові наслідки. До таких галузей належить газовидобувна промисловість України, яка в умовах воєнного стану зазнає системних втрат та перебуває під постійним тиском як фізичних, так і інформаційних загроз [1].

Газовидобувні підприємства працюють у ситуації динамічних змін виробничих режимів, порушення логістичних і технологічних ланцюгів, нестабільності доступу до ресурсів. Це призводить до підвищення ентропії інформаційних потоків, ускладнює процес прийняття рішень та знижує керованість підприємства в цілому [2]. На відміну від стабільних галузей газовидобувне підприємство характеризується високим рівнем технологічної та організаційної складності, значною кількістю параметрів стану, а також сильною залежністю від зовнішніх факторів. В умовах збройної агресії проти України газовидобувна галузь додатково стикається з необхідністю оперативного відновлення пошкоджених об'єктів, адаптації до змін попиту та пропозиції, а також швидкого коригування управлінських рішень у реальному часі [1]. За таких обставин традиційні підходи до організації інформаційного забезпечення управління виявляються недостатньо ефективними, оскільки не дозволяють кількісно оцінювати рівень невизначеності та керувати ним.

Інформаційні та ентропійні підходи до аналізу й управління складними системами сформувалися на перетині теорії інформації, кібернетики та теорії прийняття рішень. Їх концептуальною основою є трактування управління як процесу зменшення невизначеності щодо стану системи та результатів керуючих впливів. Ключовим кількісним показником такої невизначеності виступає інформаційна ентропія [3], яка визначається як міра середньої невизначеності дискретної випадкової величини. Робота [4] започаткувала застосування нечітких множин і нечіткої ентропії, що дозволило аналізувати управлінські системи з якісними параметрами та експертними оцінками. У межах теорії прийняття рішень принцип максимуму ентропії як метод побудови моделей за умов обмеженої інформації застосовується для формування оптимальних управлінських стратегій, коли доступні лише часткові відомості про систему [5].

Але зазначені класичні підходи ентропійного аналізу часто не справляються зі структурною складністю багатовимірних бізнес-даних та неоднорідними типами змінних у сучасних системах управління. Через що виникає необхідність оптимізувати управлінські рішення, що вимагає удосконалення систем управління та мінімізацію впливу людського фактору на кінцеве рішення [6].

Використання штучного інтелекту в системах підтримки прийняття рішень дозволяє вимірювати інформаційну невизначеність у технологічному розвитку та її вплив на стратегічне управління [7]. Основна цінність такого рішення полягає в тому, що ентропійні оцінки тут використовуються не тільки як міра невизначеності, але як інструмент стратегічного моніторингу технологічних змін. Проте недостатньо уваги приділяється безпосередньому управлінському впливу на зменшення ентропії.

Дослідження [8] підкреслює важливість передобробки даних при застосуванні ентропійних методів. Однак в роботі зазначається, що навіть незначні зміни в нормалізації можуть суттєво вплинути на ваги критеріїв і на рішення. Це підкреслює потребу у стандартизації процедур перед застосуванням ентропійних підходів у практичних менеджерських моделях.

Критичний аналіз наявних джерел дозволяє зробити висновок, що, незважаючи на значний теоретичний доробок у сфері ентропійного аналізу, залишається недостатньо дослідженим питання інтеграції ентропійних показників безпосередньо в математичні моделі

управління складними виробничими системами. Особливо це стосується підприємств із високим рівнем технологічної, організаційної та інформаційної невизначеності, де зменшення ентропії інформації управління може виступати самостійною метою оптимізації.

У цьому контексті актуальним є застосування апарату теорії інформації, зокрема поняття ентропії, для формалізованого опису інформаційних процесів управління. Побудова математичної моделі зменшення ентропії інформації управління газовидобувним підприємством дає змогу не лише оцінити ступінь упорядкованості управлінських рішень, але й визначити напрями оптимізації інформаційних потоків, підвищення адаптивності системи управління та зниження ризиків прийняття неефективних рішень.

Метою роботи є представлення підходу до можливого зменшення ентропії інформації управління для газовидобувного підприємства в умовах ризиків та невизначеностей.

Задачі роботи:

- запропонувати рішення задачі зменшення ентропії в інформації управління складною системою;
- представити модель забезпечення основних властивостей інформації управління з урахуванням можливої ентропії;
- запропонувати алгоритм мінімізації впливу ентропії для забезпечення основних властивостей інформації з урахуванням імовірності виникнення небезпечної події.

2. Задача зменшення ентропії в інформації управління складною системою

Підхід до обробки інформації управління повинен відображати умови щодо невизначеності впливу різних факторів на процес формування рішень і використовувати разом із формалізованими неформалізовані процедури. Сучасна газова галузь може розглядатися як складна соціотехнічна система [9], бо характеризується багаторівневою структурою, стохастичною поведінкою параметрів видобутку та значною залежністю від зовнішніх факторів. У цьому контексті інформаційна ентропія може розумітися не лише як статистичний показник, а як інтегральна міра управлінської невизначеності [3].

Для газовидобувних підприємств характерна висока ентропія первинних даних (дебіт свердловин, тиск, склад газу, характеристики роботи обладнання видобутку та контролю безпеки), що ускладнює побудову адекватних моделей прийняття рішень без спеціальних процедур інформаційного впорядкування. Через ці фактори зменшення ентропії інформації повинно досягатися не лише за рахунок покращення якості сенсорних даних, а й шляхом структурної оптимізації інформаційних потоків у системах управління. Однак досвід роботи на газовидобувних підприємствах показує, що більшість робіт зосереджується на інфраструктурному рівні, залишаючи рівень підприємства як організаційної системи недостатньо формалізованим.

Критичний аналіз публікацій [1–2, 6–8] дозволяє виділити такі обмеження:

- фрагментарність застосування: ентропія часто враховується локально (для окремих рішень), а не як системоутворюючий параметр управління підприємством;
- недостатня інтеграція організаційного рівня: більшість моделей управління орієнтовано на технічні процеси, а не на інформаційні процеси;
- обмежена галузева специфіка з власною інформаційною ентропією.

Формалізація зазначених обмежень може виступати самостійним об'єктом оптимізації. Тобто, обмеження можуть виступати однотипними за формальним визначенням, але різними за функціональною реалізацією. Будь-яке газовидобувне підприємство є великою ієрархічною компанією, що складається з низки підрозділів. Кожен підрозділ підприємства буде формулювати власний вектор-функцію управління. Цей вектор-функція описується визначеними факторами з незалежним впливом невизначених факторів або обмежень на кожний окремий підрозділ:

$$\begin{aligned} f_{i1} &= f_{11i1}(x_1) + f_{12i1}(\hat{x}_2) + f_{13i1}(\alpha_1), i_1 = \overline{1, m_1}, \\ f_{2i2} &= f_{21i2}(\hat{x}_1) + f_{22i2}(x_2) + f_{23i2}(\alpha_2), i_2 = \overline{1, m_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

де f_{i1} — функція мети окремого підрозділу підприємства;

f_{2i2} — функція мети деякого іншого підрозділу;

f з індексами — функціональні складові;

x — вектор змін окремих функцій;

i — показник мети;

α — вектор характеристики поточної ситуації;

m — фактори, що впливають на поточну ситуацію.

Отже, для першої функції елементи моделі (1) відображають, по-перше, компонент цілі, поданий як залежність від вектору x_1 , що змінюється в межах окремого підрозділу газовидобувного підприємства. Другий елемент відповідає прогнозованому опису функції вектора дій іншого підрозділу цього ж підприємства. Третій елемент характеризує стан середовища, який визначається вектором α , що кількісно описує відповідну ситуацію. Аналогічний підхід використовується і для опису іншої наведеної функції.

Крім того, доцільно враховувати роль кожного підрозділу відносно інших з огляду на наявність невизначеності, неповноти та можливої недостовірності інформації щодо їхніх дій. Водночас в умовах небезпеки, наприклад, спричиненої військовими діями, цілі всіх підрозділів мають взаємозалежний характер і формалізуються за допомогою мультиплікативних функцій:

$$\begin{aligned} & [1 + f_{11i1}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1)] \\ &= [1 + f_{11i1}(x_1)]^{\gamma_{11i1}} \cdot [1 + f_{12i1}(\hat{x}_2)]^{\gamma_{12i1}} \cdot [1 + f_{13i1}(\alpha^1)]^{\gamma_{13i1}}; i \\ &= \underline{1, m}, f_{11i1}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1) \\ &= \{[1 + f_{11i1}(x_1)]^{\gamma_{11i1}} \cdot [1 + f_{12i1}(\hat{x}_2)]^{\gamma_{12i1}} \cdot [1 + f_{13i1}(\alpha^1)]^{\gamma_{13i1}} \\ &\quad - 1\}; i_1 = \underline{1, m_1}, \end{aligned} \quad (2)$$

де x, \hat{x} — аргументи вирішення різноспрямованих задач;

γ — параметри поточної надзвичайної події.

З урахуванням їх фізичного змісту, функції f , аргументи та параметри, що входять до співвідношення (2), у якому α подано у вигляді вектора, відповідають таким умовам:

$$\begin{aligned} f_{11i1}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1) &\geq 0; f_{11i1}(x_1) \geq 0; x_1 = (x_{1j1} | x_{1j1} \geq 0; j_1 = \underline{1, n_{1j1}}), \hat{x}_2 = (x_{2j2} | \hat{x}_{2j2} \\ &\geq 0; j_2 = \underline{1, n_{2j2}}); \alpha_1 = (\alpha_{1k1} | x_{1r1} \geq 0; k_1 = \underline{1, k_{01}}), \gamma_{11} \\ &= (\gamma_{11i1} | \gamma_{11i1} \geq 0; i_1 = \underline{1, m_1}); \gamma_{12} = (\gamma_{12i1} | \gamma_{12i1} \geq 0; i_1 \\ &= \underline{1, m_1}), \gamma_{13} = (\gamma_{13i1} | \gamma_{13i1} \geq 0; i_1 = \underline{1, m_1}); \gamma_{11i1} \in \gamma_{11}; \gamma_{12i1} \\ &\in \gamma_{12}; \gamma_{13i1} \in \gamma_{13}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $f_{i1}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1)$ — загальна функція безпеки;

\hat{x}_2 — незалежна змінна вирішення задач для низки підрозділів одного підприємства;

$\gamma_{11,13}$ — змінні вагомих подій, що впливають на роботу підприємства.

Тоді, враховуючи (3), модель (2) можна представити так:

$$f_{11i1}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1) = \exp \exp \{ \gamma_{11i1} \ln[1 + f_{11i1}(x_1)] + \gamma_{12i1} \ln[1 + f_{12i1}(\hat{x}_2)] + \gamma_{13i1} \ln[1 + f_{13i1}(\alpha_1)] \} - 1. \quad (4)$$

Отже, мультиплікативні функції, що описують діяльність підприємства з урахуванням зміни поточної ситуації, можуть бути трансформовані в адитивну форму подання. Це дозволяє здійснювати декомпозиції для виявлення системної невизначеності, яка становить одну з ключових проблем виникнення ентропії в інформації управління.

Сучасні моделі управління вітчизняними підприємствами, які не були розраховані на кризове регулювання діяльності під час збройного конфлікту, передбачали поетапний перехід від початкової інформаційної невизначеності задачі організації виробничого процесу до повної визначеності. Наявні моделі відображають об'єктивну потребу системи управління у багатоетапній перевірці інформації в процесі її перетворення на предмет узгодженості, несуперечності та повноти. Адже некоординованість програмних рішень і планів, надзвичайні події та аварійні зупинки, суперечність та несвоєчасність інформації призводять до зростання інформаційної ентропії в управлінні.

Інформаційна ентропія формалізується за допомогою математичного виразу, який характеризує рівень невизначеності повної сукупності випадкових подій або можливих станів системи:

$$E = - \sum_{i=1}^n p_i \log \log p_i . \quad (5)$$

За своїм змістом ентропія є величиною, оберненою до кількості інформації. Показник E слугує мірою невизначеності множини, що складається з n випадкових подій із відповідними ймовірностями p_1, \dots, p_n . Ентропія як кількісна характеристика невизначеності інформації потребує відповідної адаптації до умов системи управління підприємств, які працюють в умовах кризи, надзвичайної ситуації і, одночасно, відносяться до потенційно небезпечних об'єктів та підприємств критичної інфраструктури.

Якщо врахувати дослідження роботи [10] та додати аспекти використання штучного інтелекту в сучасних системах підтримки прийняття рішень [11], то можна розкрити системну невизначеність за вектором задач функціонування за призначенням. Тобто, виконувати свою мету функціонування (O_F):

$$O_F = (F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n), \quad (6)$$

де $F^1 - F_n$ — окремі задачі, пов'язані з реалізацією конкретної функції системи в межах заданих умов експлуатації;

1, 2, 3...n — перелік типових завдань, які здатне реалізувати хімічне підприємство за призначенням.

З урахуванням моделі (4), системи обмежень та області допустимих рішень вектор задач функціонування за призначенням (6) може бути описаний так:

$$O_F = \{(f_i(x), \Omega_i, C_i)\}_{i=1}^n, \quad (7)$$

де $f_i(x)$ — критеріальна функція i -ї задачі;

Ω_i — область допустимих рішень;

C_i — система обмежень, що визначає умови функціонування за призначенням.

У формулі (7) мінімізація ентропії не виступає явно. Але вона може бути розглянута шляхом оптимізації критеріальної функції $f_i(x)$, яка може розглядатися як міра невизначеності стану системи.

3. Забезпечення основних властивостей інформації управління

Міра невизначеності процесу управління E у межах даного дослідження розглядається як узагальнений показник, що характеризує дефіцит, неузгодженість і часову невідповідність

інформації щодо ресурсного забезпечення, нормативних регламентів та управлінських рішень персоналу в системі управління. Застосування такої міри потребує наявності формалізованих умов формування та підтримки бази знань у системі управління підприємством. Ключову роль у цьому відіграють вимоги до структурної організації інформаційних записів у базі даних системи підтримки прийняття рішень, оскільки саме стандартизована структура подання даних забезпечує можливість їх коректного зіставлення. Це, зі свого боку, створює передумови для кількісної оцінки рівня невизначеності інформації, що надається управлінському персоналу в процесі прийняття рішень, на основі порівняльного аналізу інформаційних записів. На основі цієї інформації і формується вектор задач, описаний моделлю (7).

Розглядаючи модель (4), можна зазначити, що кожна часткова задача відповідає окремому аспекту реалізації функціонального призначення системи в заданих умовах експлуатації ресурсів, використання регламенту управління та виконання персоналом функціональних обов'язків. Мінімізація управлінської невизначеності в межах кожної задачі досягається шляхом включення до критеріальної функції ентропійної складової, яка кількісно характеризує ступінь неупорядкованості або неповноти інформації про стан системи. У загальному випадку критеріальна функція може бути подана у вигляді

$$f_i(x) = H_i(x) + \lambda_i R_i(x) \rightarrow \min, \quad (8)$$

де $H_i(x)$ — ентропійна міра невизначеності функціонування системи;

$R_i(x)$ — додаткова складова, що відображає функціональні, енергетичні або економічні характеристики системи;

λ_i — ваговий коефіцієнт, який визначає пріоритетність зменшення ентропії відносно інших критеріїв оптимізації.

Отже, з огляду на модель (8), мінімізація ентропії здійснюється не ізольовано, а в інтегрованому вигляді — через оптимізацію критеріальної функції кожної часткової задачі з урахуванням системи обмежень C_i та області допустимих рішень Ω_i . Такий підхід забезпечує узгоджене зменшення невизначеності та підвищення керованості системи в процесі її функціонування за призначенням.

Певна сукупність знань про функціонування підприємства наведена у внутрішніх звітах, статистичних даних та нормативно-правових документах. Тож таку інформацію можна представити формально як суму записів у базі даних системи обробки інформації про ресурси X , регламент Y та повноваження ієрархії персоналу H :

$$X(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^n (a, b, c, d) \quad (9)$$

на множині записів про ресурси підприємства $I = \{i \mid 1 \leq i \leq n\}$, де a — ідентифікатор ресурсу, b — об'єм використання ресурсу, c — структурна належність, d — формалізований опис управлінського рішення щодо забезпечення властивостей інформації про використання ресурсу;

$$Y(a, c, d, e) = \sum_{j=1}^m y_j(a, c, d, e) \quad (10)$$

на множині записів про регламент функціонування підприємства $J = \{j \mid 1 \leq j \leq m\}$, де a — ім'я елементарної операції із забезпечення функціонування підприємства для досягнення поставлених задач, c — структурна належність управлінського рішення до технологічної процедури, що забезпечує властивості інформації у межах поставленої задачі, d — формалізований опис процедури виконання управлінського рішення, e — характеристики виконання операції з мінімізації інформаційної невизначеності при виконанні поставленої задачі;

$$H(a, c, d, e) = \sum_{q=1}^l H_q(a, c, d, e) \quad (11)$$

на множині записів про ресурси $H = \{q | 1 \leq q \leq l\}$, де a — позначення рішення управлінського персоналу щодо використання людських ресурсів у межах ієрархії, c — структурна належність рішення до процесу забезпечення властивостей інформації у регламенті, d — ознаки рішення із забезпечення властивостей інформації, e — ознаки виконання рішення із забезпечення властивостей інформації.

Отже, міра інформаційної невизначеності процесу управління E може бути визначена як відносний показник, що характеризує частку неповних інформаційних записів у базі даних, які стосуються ресурсного забезпечення, нормативних регламентів та відповідних управлінських рішень порівняно з еталонним станом повністю сформованої бази даних.

$$E(X, Y, H) = \left(\sum_{i=1}^n x'_i + \sum_{j=1}^m y'_j + \sum_{q=1}^l h'_q \right) / \left(\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j + \sum_{q=1}^l h_q \right), \quad (12)$$

де узагальнюється кількість записів у системі для прийняття обґрунтованого рішення із забезпеченням зменшення ентропії інформації управління. У моделі (12) апострофом позначені дані x'_i, y'_j, h'_q поточного завдання, інформація про яке відома, точна і несуперечна. Вони порівнюються з даними моделювання ситуації (задачі чи події), інформація про яку могла містити ознаки неповноти, суперечності та несвоєчасності. У випадку, коли $E \rightarrow 0$, невизначеність знань про підприємство, що виступає об'єктом управління, зростає. При $E \rightarrow 1$ обсяг знань про об'єкт управління буде повним.

Повноту, несуперечність та своєчасність інформації для забезпечення реалізації моделі (12) можна розраховувати, виходячи з роботи [10]. Проте, на відміну від зазначеної роботи [10], для газовидобувного підприємства, враховуючи, що подібний об'єкт управління одночасно є критичною інфраструктурою та потенційно небезпечним об'єктом, своєчасність краще формалізувати через «дерево подій» [12].

На схемі (рис. 1) наведено «дерево подій» для газовидобувного підприємства. Прийнято, що A — ситуація в межах регламенту, B — ризикова ситуація, C — криза. За роботою [10] застосовані такі визначення: t_0 — момент отримання інформації, t^- — момент закінчення процедури формування рішення за умови, що тривалість цієї процедури T^- , t^+ — момент завершення процедури формування рішення за умови, що тривалість цієї процедури T^+ , t_{rk} — момент реалізації рішення для k -ситуації, t_{fk} — момент початку формування рішення для k -ситуації, t_{fk} — момент закінчення формування рішення для k -ситуації, T^- — мінімально можлива довжина періоду формування рішення для заданої множини ситуацій, T^+ — максимально можлива довжина періоду формування рішення для заданої множини ситуацій, T_{rk} — довжина періоду від моменту початку формування рішення до моменту його реалізації для конкретної k -ситуації, T_M^+ — максимально можлива для заданої множини ситуацій довжина періоду до моменту початку формування рішення до моменту його реалізації, тобто, T_M^+ — максимум T_{rk} на множині ситуацій, T_M^- — мінімально можлива для заданої множини ситуацій довжина періоду від моменту початку формування рішення до моменту його реалізації, тобто T_M^- — мінімум T_{rk} на множині ситуацій, T_{fk} —

довжина періоду від моменту початку формування рішення k -ситуації до моменту його закінчення. $K_1 — K_4$ позначені рівні суперечесності інформації на підприємстві при відхиленні роботи від регламентних процедур.

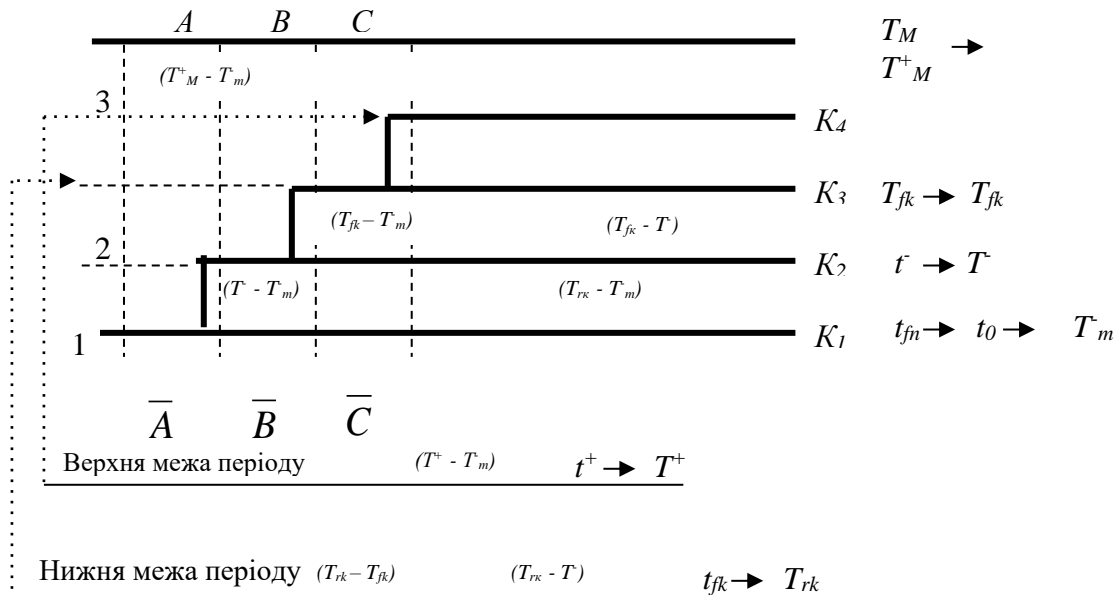


Рисунок 1 — «Дерево подій» своєчасності інформації для газовидобувного підприємства

Окрім того, область 1 відповідає несвоєчасності інформованості персоналу в разі виникнення аварії та розвитку аварійної ситуації в катастрофічну, область 2 є областю ризикованої своєчасності, а область 3 є областю гарантованої своєчасності інформованості, коли наявна інформація про стан роботи в межах регламенту або аварійних подій, що визначені регламентом як типові.

Завершальний етап формалізації за моделлю (12) передбачає попереднє визначення інформаційних характеристик, що описують ступінь адекватності, актуальності та надійності наведеної моделі. На основі цих характеристик здійснюється упорядкування множини можливих управлінських ситуацій шляхом їх групування за встановленими ознаками. Такий підхід дозволяє ідентифікувати інформаційні компоненти, які визначають рівень якості управлінських рішень, а також ступінь їх аргументованості в момент практичного впровадження.

4. Забезпечення основних властивостей інформації з урахуванням імовірності виникнення небезпечної події

Одним із базових завдань моделі забезпечення зменшення ентропії інформації управління є формалізація механізмів узгодженого функціонування технологій кризового моніторингу, кризового управління та штатних процедур управління ресурсами, інфраструктурними елементами, регламентними обмеженнями і системою загального контролю стану об'єкта. У зазначеному контексті процес прийняття управлінських рішень розглядається як функція інформаційного забезпечення, що формується в умовах неповноти, суперечливості та часової деградації даних.

Інформаційно-аналітична підтримка рішень у кризових ситуаціях базується на поєднанні експертних систем, механізмів колективного вибору та методів нечіткої логіки, які дозволяють оперувати лінгвістичною та неповною інформацією. Разом з тим для підвищення обґрунтованості управлінських рішень експертні процедури доцільно інтегрувати з

формалізованими математичними моделями, що забезпечують кількісну оцінку рівня невизначеності інформації.

Ключовою проблемою практичного застосування технологій управління підприємством залишається відсутність чітко формалізованого причинно-наслідкового зв'язку між своєчасним переходом від штатного режиму управління до кризового та ефективністю запобігання розвитку аварійної ситуації. Кризова ситуація (КС), на відміну від штатної ситуації (ШС), характеризується істотним зростанням інформаційної невизначеності та не може бути адекватно компенсована методами стандартного управління. Відповідно, завдання оперативної ідентифікації моменту переходу системи зі стану ШС у КС набуває принципового значення та потребує розвитку методів, орієнтованих на системи підтримки прийняття рішень.

З позицій ентропійного підходу стан інформаційного забезпечення управління може бути описаний через ентропійну міру невизначеності $H(t)$, яка є функцією часу і відображає ступінь неупорядкованості інформації щодо ресурсів, регламентів і дій персоналу. Зростання $H(t)$ свідчить про втрату актуальності або узгодженості даних і, відповідно, про зниження якості управлінських рішень. У цьому випадку перехід до кризового управління доцільно інтерпретувати як необхідність мінімізації ентропії інформаційного стану системи:

$$H(t) \rightarrow \min, t \in [t_0, t_1]. \quad (13)$$

З урахуванням вимог управління в реальному часі вводиться бінарний показник оперативності T , який набуває значення $T = 0$ за умови своєчасного надходження інформації, та $T = 1$ у разі порушення часових обмежень. Кожному запису в базі даних системи обробки інформації відповідає часовий інтервал актуальності $[t_b]$, в межах якого інформація зберігає управлінську цінність. Порушення цього інтервалу призводить до зростання ентропії інформаційного стану та, відповідно, до погіршення керованості системи.

У загальному вигляді інформацію управління доцільно розглядати як функцію не лише параметрів стану системи, а й часу, що дозволяє формалізувати вплив часових факторів на рівень інформаційної невизначеності та забезпечити інтеграцію ентропійних критеріїв у процедури ситуаційного управління.

$$T = 0, \text{ якщо } \{x_i(a, b, c, d, t_0 - t_k) \in X; y_j(a, c, d, e, t_0 - t_k) \in Y; h_q(a, c, d, e, t_0 - t_k) \in H, \text{ якщо } t_0 < t < t_k. \quad (14)$$

Крім вже наведених у формулах (9)–(11) визначень для a, b, c, d, e , додатково, аналогічно роботі [10] у записах бази даних враховуються ознаки актуальності запису у часі на інтервалі актуальності $t_0 < t < t_k$, який визначається в планових документах. Тобто, запис у базі даних є актуальним для прийняття рішення, тому що співпадає з часовим інтервалом адекватності інформації.

Вихід записів про ресурси — x_i та регламент — y_j за межі визначеного відрізка часу робить її неактуальною (архівною), але вона не може бути скасованою до отримання актуальної інформації. У той же час вихід за межі визначеного відрізка часу інформації про повноваження (рішення) — h_q є показником ситуації, оскільки визначає факт неприйняття керівництвом своєчасного рішення, за яким ситуація стає кризовою на своєму масштабі значимості:

$$T = 1, \text{ якщо } \{x_i(a, b, c, d, t \geq t_k) \Rightarrow \text{архів}; y_j(a, c, d, e, t \geq t_k) \Rightarrow \text{архів}; z_q(a, c, d, e, t \geq t_k) \Rightarrow \text{криза}. \quad (15)$$

Відсутність цілісного системного підходу до формалізації процедур кризового управління в межах проектних технологій управління підприємством зумовлює ситуацію, за якої особи, що приймають рішення, у кризових умовах змушені застосовувати інструменти, переважно орієнтовані на штатні режими функціонування. У результаті управлінські рішення формуються за умов дефіциту релевантної інформації та відсутності уніфікованої технології кризового реагування, що істотно підвищує рівень інформаційної невизначеності. З метою оцінки конкретної ситуації у зазначеному випадку пропонується алгоритмічна процедура, орієнтована на мінімізацію ентропії кризового стану та скорочення часу локалізації й усунення аварійної ситуації (рис. 2).

Представлена на рис. 2 функціональна схема процесу побудована стосовно умов газовидобувного підприємства з урахуванням нелінійності розвитку процесу кризової та надзвичайної ситуацій. Алгоритм розпочинається з прийому сигналу про відхилення параметрів технологічного процесу від регламентних.

Зона I на рис. 2 — зона першого рівня реагування, коли при відхиленні показників відбуваються збір первинної інформації та аналіз процедур для запобігання виникнення загрози. За підсумками відбувається передача інформації, яка необхідна для прийняття рішень у випадку залучення третього рівня захисту. З цієї інформації формується множина подій, яким визначають можливі оцінки Ω .

Зона II — зона другого рівня реагування, де з метою недопущення розвитку аварії відбувається реагування уповноваженого персоналу на місцях. Інформація для формування множини подій для визначення можливих оцінок також передається на рівень III.

Поки розвиток подій стримують ситуаційні рішення, відбуваються прийняття рішення відносно шансів несприятливого розвитку подій і залучення додаткових сил і засобів для локалізації та ліквідації аварії без втрат часу на прийняття рішення: визначаються допустимі оцінки $\tilde{\Omega}$; розв'язується задача вибору найкращої оцінки α для кожного можливого рішення. Потім проводяться обробка оцінок та знаходження результуючої оцінки, що і є рішенням початкової задачі оцінювання. У випадку, якщо отриманий результат не задовольняє умовам деякої ситуації A , що може виникнути на газовидобувному підприємстві, то процедура вибору повторюється. У підсумку аналізується можливість розвитку ситуації, коли подія A викличе появу події B , наприклад, проблема з обладнанням призведе до пожежі.

У математичному вигляді алгоритм може бути представлений моделлю, в якій прийняті додаткові такі визначення: φ — обробка оцінок, P — подія, p — ознака події, ω — міра зв'язку, C — складна оцінка (множина оцінок), α — оцінка, A — подія, виникнення якої може спричинити також і розвиток іншої події — B .

Перший крок — можливі оцінки визначаються за допомогою задачі оцінювання. Наступним кроком є вибір найкращої оцінки з множини оцінок $\alpha_i = C_i(\bar{\Omega}) \in \bar{\Omega}, i = \overline{1, n}$ та їх обробка $\bar{\Omega}_n \rightarrow \Omega, \alpha = \varphi(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$.

У даному випадку (вихід показників технологічного процесу за межі норми) найкращою оцінкою вибору є оцінка появи події A (проблеми з обладнанням), яка викличе подію B (вибух із виникненням пожежі).

Тому за наведеним алгоритмом (рис. 2) наступним кроком моделі буде визначення шансів появи несприятливої події A :

$$\bar{\Omega}_A = \frac{P(B|A)}{P(\bar{B}|A)}, \quad (16)$$

де $\bar{\Omega}_A$ — ймовірність розвитку події B у разі виникнення події A .

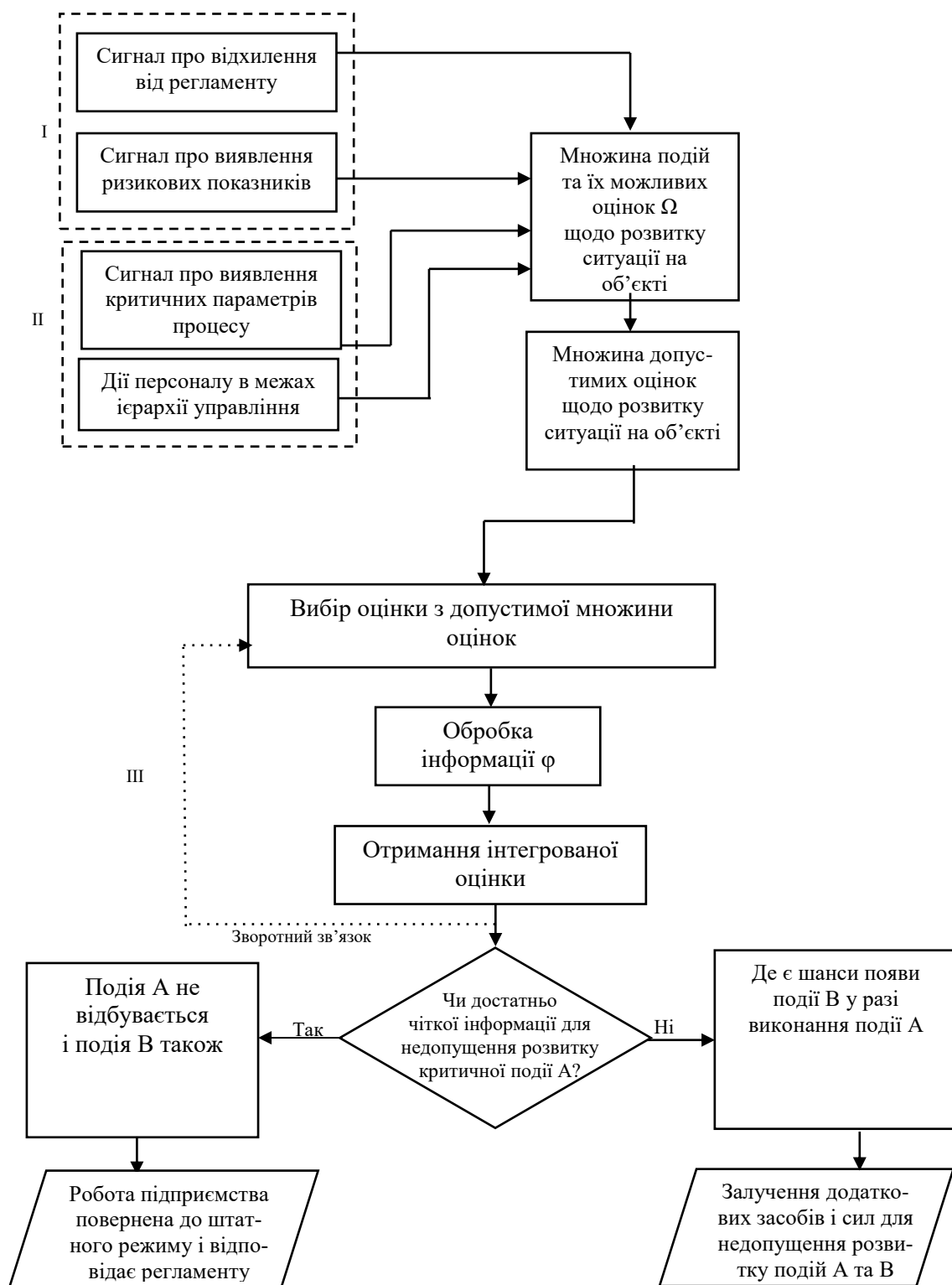


Рисунок 2 — Функціональна схема алгоритмічної процедури мінімізації ентропії

Оцінювання подій за сукупністю ознак доцільно здійснювати на основі моделі чотириклітинної таблиці спряженості (табл. 1).

Таблиця 1 — Таблиця оцінювання подій

Ознака А	Ознака В		
	Наявність	Відсутність	Усього
Наявність	n_{11}	n_{12}	$n_{1.}$
Відсутність	n_{21}	n_{22}	$n_{2.}$
Усього	$n_{.1}$	$n_{.2}$	$n_{..}$

Тоді оцінки подій можуть бути проведені так:

$$p(B|A) = \frac{p_{11}}{p_{1.}}, \quad p(\bar{B}|A) = \frac{p_{12}}{p_{1.}}, \quad (17)$$

$$\alpha_A = \frac{p_{11}/p_{1.}}{p_{12}/p_{1.}} = \frac{p_{11}}{p_{12}}.$$

Тобто проблеми з обладнанням, з урахуванням нелінійного розвитку аварії, з великою ймовірністю викличуть наступний вибух і пожежу.

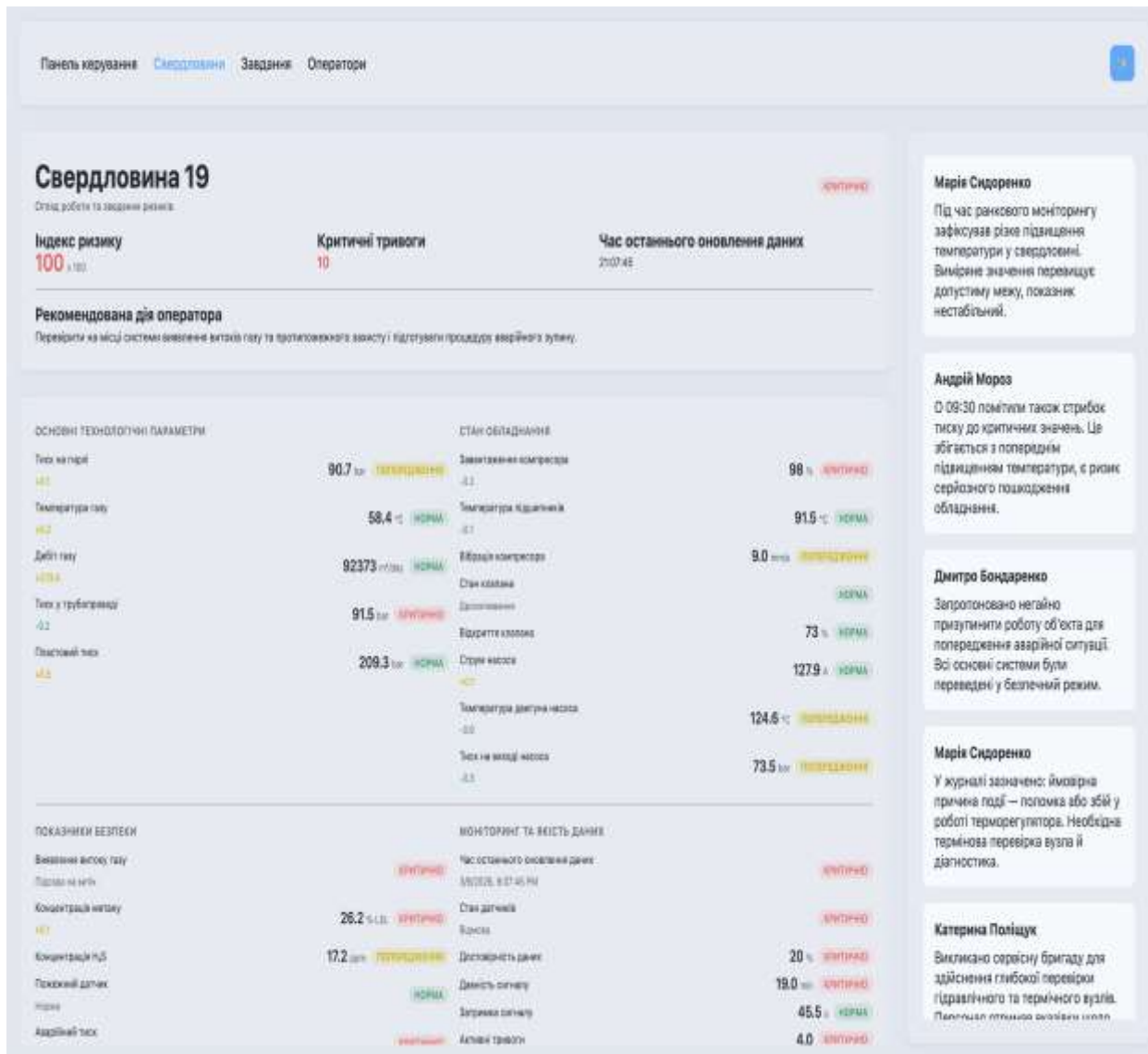


Рисунок 3 — Інтерфейс додатка для моніторингу стану свердловин

У випадку, коли подія A не відбувається, оцінка події B за аналогічним алгоритмом із визначенням міри зв'язку величин

$$\omega = \frac{\Omega_A}{\Omega_{\bar{A}}} \quad (18)$$

за умови актуальності інформації у часі $t_0 < t < t_k$.

Сприятливий підсумок моделі — перехід нештатного режиму до штатного з отриманням інтегрованої оцінки розвитку події для розроблення рекомендацій із запобігання повторення ситуації.

На основі моделі (12) та функціональної схеми (рис. 2) був розроблений додаток для відслідковування параметрів технологічного процесу на окремо розташованих свердловинах газовидобувного підприємства за описом ресурсів, відповідності процесів регламенту та виконання повноважень ієрархії персоналу (рис. 3).

Додаток (рис. 3) представляє собою дашборд із порівнянням роботи свердловин із відслідковуванням відхилення процесів та збором і аналізом інформації щодо прийнятих ситуаційних рішень у межах повноважень персоналу на кожній свердловині. У разі виникнення ризикової ситуації відбувається аналіз із пропозицією використання окремих ресурсів та персоналу суміжних свердловин для повернення ситуації в межі регламенту.

5. Висновки

1. Запропоновано рішення задачі зменшення ентропії в інформації управління складною системою. Проаналізовано міру невизначеності процесу управління підприємством, яка інтерпретується як показник, що відображає дефіцит, неузгодженість і часову неактуальність інформації щодо ресурсного забезпечення, регламентних вимог та управлінських дій персоналу в межах відповідної системи управління.

2. Розроблена модель забезпечення основних властивостей інформації управління з урахуванням можливої ентропії. У ході дослідження розроблено та обґрунтовано низку методичних і прикладних рішень, зокрема підходи до аналізу системної невизначеності в умовах функціонування газовидобувного підприємства, яке є підприємством критичної інфраструктури та потенційно небезпечним об'єктом; метод визначення адекватності моделі конкретному часовому моменту виконання завдання з урахуванням заданого рівня ризику та ресурсу допустимого ризику, що створює передумови для переходу від нештатного режиму до штатного без допущення розвитку катастрофічних процесів.

3. Представлено алгоритм мінімізації впливу ентропії для забезпечення основних властивостей інформації з урахуванням імовірності виникнення небезпечної події. Сформульовано підходи до оцінювання своєчасності та повноти інформованості на основі побудови «дерева подій», а також розроблено алгоритм аналізу виникнення взаємопов'язаних подій для проведення експертної оцінки моделі, адаптованої до умов конкретної ситуації на підприємстві.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Морозова О.С., Земляков І.С., Лозінська Л.Д., Кулик Т.П., Гараздюк В.В. Економіка газової промисловості України в умовах воєнного стану. *Актуальні питання економічних наук*. 2024. № 6. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14909772>.
2. Kalina J. Entropy techniques for robust management decision making in high-dimensional data. *Serbian Journal of Management*. 2024. N 19 (2). P. 471–483. DOI: <https://doi.org/10.5937/sjm19-48723>.
3. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*. 1948. N 27 (3). P. 379–423; 1948. N 27 (4). P. 623–656. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.

4. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. N 8 (3). P. 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
5. Jaynes E.T. Information theory and statistical mechanics. *Physical Review*. 1957. N 106 (4). P. 620–630. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.620>.
6. Kalina J. Entropy techniques for robust management decision making in high-dimensional data. *Serbian Journal of Management*. 2024. N 19 (2). P. 471–483. DOI: <https://doi.org/10.5937/sjm19-48723>.
7. García-Vidal G., Sánchez-Rodríguez A., Guzmán-Vilar L., Pérez-Campdesuñer R., Martínez-Vivar R. Entropy-Based Assessment of AI Adoption Patterns in Micro and Small Enterprises: Insights into Strategic Decision-Making and Ecosystem Development in Emerging Economies. *Information*. 2025. N 16 (9). P. 770. DOI: <https://doi.org/10.3390/info16090770>.
8. Roszkowska E., Wachowicz T. Impact of Normalization on Entropy-Based Weights in Hellwig's Method: A Case Study on Evaluating Sustainable Development in the Education Area. *Entropy*. 2024. N 26 (5). P. 365. DOI: <https://doi.org/10.3390/e26050365/>.
9. Cardenas I.C., Kozine I. Customizing an Approach to Analyze an Underspecified Socio-Technical System. *Engineering Management Journal*. 2025. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1080/10429247.2025.2502690>.
10. Кряжич О.О., Захматов В.Д. Математичні моделі забезпечення імпульсного вибухопожежного захисту хімічного підприємства. *Математичні машини і системи*. 2012. № 4. С. 168–174.
11. Іванов В.Г., Захожай О.І., Кряжич О.О. Адаптивний алгоритм запобігання погрішностям математичних міркувань у системах штучного інтелекту. *Математичні машини і системи*. 2025. № 1. С. 42–54.
12. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Хміль Г.А. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. К.: Наукова думка, 2008. 543 с.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2025 / прийнята до друку 12.02.2026