

ОЦІНКА РИЗИКУ ПОРУШЕННЯ СТАЛОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ МОРСЬКОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМІНАЛУ

І.М. Ларіна

Phd здобувач кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет,

Одеса, Україна

ORCID ID: 0009-0005-1169-7223

Анотація

Стале функціонування морських контейнерних терміналів забезпечує необхідний рівень контейнерної логістики, що є важливим для транспортної галузі країни та конкурентоспроможності українських портів. Для підприємств, які пов'язані з певною виробничою системою та відповідним комплексом технічних засобів та технологічного обладнання, стале функціонування визначається можливістю забезпечення певного рівня виробничої потужності. Для контейнерних терміналів такою характеристикою є пропускна спроможність терміналу. Забезпечення певного рівня пропускної спроможності терміналу базується на моніторингу та оцінці ризиків порушення сталого функціонування для подальшої розробки відповідного комплексу заходів протидії. Запропоновано метод оцінки ризику порушення сталого функціонування контейнерного терміналу у контексті його техніко-технологічної системи. Оцінка ризику сталого функціонування терміналу в цілому передбачає покроковий розгляд ризику функціонування технологічного комплексу певного причалу, а також ризику функціонування певного технологічного обладнання – враховуючи декомпозицію пропускної спроможності терміналу та умови його сталого функціонування. Такій підхід враховує певний вплив устаткування та причалів на загальну пропускну спроможність терміналу. Запропонований метод базується на існуючих підходах для оцінки ризиків у різних сферах, розвиваючи їх з урахуванням сутності та прийнятих критеріїв сталого функціонування, а також у прикладному напрямку з врахуванням галузевої специфіки при формуванні системи факторів впливу, а також при формалізації важелів елементів (устаткування) та підсистем (причалів) у структурі загального (інтегрального) ризику порушення сталого функціонування терміналу. Проведено відповідні експериментальні розрахунки з метою перевірки працездатності запропонованого методу та його достовірності.

Ключові слова: контейнерні перевезення, термінал, порт, ризик, пропускна спроможність, ймовірність.

**RISK ASSESSMENT OF MARINE CONTAINER TERMINAL TECHNOLOGICAL
SYSTEM SUSTAINABLE FUNCTIONING DISTURBANCE**

I.M. Larina

Phd applicant of the Department “Port Operations and Handling Technology”,
Odesa National Maritime University,
Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0005-1169-7223

Summary

Sustainable operation of sea container terminals provides the necessary level of container logistics, which is important for the country's transport industry and the competitiveness of Ukrainian ports. For enterprises that are associated with a certain production system and a corresponding set of technical means and technological equipment, sustainable operation is determined by the ability to ensure a certain level of production capacity. For container terminals, such a characteristic is the terminal's throughput capacity. Ensuring a certain level of terminal throughput is based on monitoring and assessing the risks of disruption of sustainable operation for the further development of an appropriate set of countermeasures. A method for assessing the risk of disruption of sustainable operation of a container terminal in the context of its technical and technological system is proposed. The assessment of the risk of sustainable operation of a terminal as a whole involves a step-by-step consideration of the risk of the operation of the technological complex of a particular berth, as well as the risk of the operation of certain technological equipment – taking into account the decomposition of the terminal's throughput capacity and the conditions of its sustainable operation. This approach takes into account a certain influence of equipment and berths on the overall throughput of the terminal. The proposed method is based on existing approaches to risk assessment in various areas, developing them taking into account the essence and accepted criteria for sustainable operation, as well as in an applied direction taking into account industry specifics when forming a system of influence factors, as well as when formalizing the levers of elements (equipment) and subsystems (berths) in the structure of the general (integral) risk of disruption of the sustainable operation of the terminal. Relevant experimental calculations have been carried out to verify the operability of the proposed method and its reliability.

Key words: container transportation, terminal, port, risk, capacity, probability.

Вступ. Сучасні контейнерні перевезення мають справу з множиною викликів – автоматизація [1, 2], цифровизація [3, 4], екологічність [5], що у свою чергу формує нові виклики та завдання для портів та портівих терміналів. Проте вплив зовнішнього середовища та невизначеність контейнеропотоків [6, 7] обґрунтовують необхідність забезпечення сталого функціонування терміналів та портів.

Стале функціонування морських контейнерних терміналів забезпечує необхідний рівень контейнерної логістики, що є важливим для транспортної галузі країни та конкурентоспроможності українських портів.

Для підприємств, які пов'язані з певною виробничою системою та відповідним комплексом технічних засобів та технологічного обладнання, стає функціонування визначається можливістю забезпечення певного рівня виробничої

потужності. Для контейнерних терміналів такою характеристикою є пропускна спроможність терміналу.

Забезпечення певного рівня пропускної спроможності терміналу базується на моніторингу та оцінці ризиків порушення сталого функціонування для подальшої розробки відповідного комплексу заходів протидії.

Постановка проблеми. На функціонування системи можна дивитися з різних точок зору – у сучасній науковій літературі розглядаються поняття «ефективне функціонування», «оптимальне функціонування», «безперебійне функціонування» та т.п. Це відповідає основним характеристикам функціонування системи, до яких відноситься ефективність, надійність, якість керування, перешкодозахищеність, стійкість і ступінь складності тощо [8, 9]. «Стале функціонування» є також одним з варіантів розгляду функціонування та пов'язано з такою характеристикою системи як «стійкість».

У сучасній літературі крім терміну «стале функціонування» використовується також термін «функціональна стійкість». Функціональна стійкість – більш комплексне поняття, яке включає в собі поняття надійності, живучості та відмовостійкості [10]. На базі аналізу джерел, можна зробити висновок про те, що термін «стале функціонування» є більш узагальнюючим для систем будь-якої природи, характеризуючи таку характеристику функціонування як «стійкість». «Функціональна стійкість» [11] є більш конкретним проявом сталого функціонування для технічних (інформаційних) систем.

Таким чином, можна стверджувати, що більшість сучасних джерел, які присвячено «сталому функціонуванню», як правило, розглядають в якості об'єкту інформаційні системи (у тому числі, керуючих систем як бортові системи літаків та кораблів [12]). Не дивлячись на те, що стале функціонування може бути застосовано для усіх видів систем, проте для підприємств, виробничих систем це майже не розглядається – але є виключення, наприклад, роботи [10, 14], хоча забезпечення необхідних параметрів функціонування є важливим для них також.

Якщо аналізувати англomовну сучасну літературу з ключовими словами «сталый розвиток» та «стале функціонування» (Sustainable operating, functioning), то сутністю відповідних досліджень є, перш за все, екологічні питання та питання економії палива, у тому числі, в транспортній сфері взагалі та портовій діяльності окремо, наприклад, [15, 16]; зменшення шуму та екологічного навантаження на місце та прилягаючі території порту визначається як забезпечення сталого функціонування порту. Таким чином, розглядаючи проблему сталого функціонування слід прийняти до уваги різницю у вітчизняної та зарубіжної термінології.

Таким чином, можна стверджувати, що питання сталого функціонування контейнерних терміналів потребують наукової уваги з урахуванням запиту практики та практичної відсутності необхідного теоретичного базису, у тому числі, для оцінки ризику порушення сталого функціонування контейнерного терміналу.

Ціль статті. Метою даного дослідження є розробка методу оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу для моніторингу в процесах її забезпечення.

Результати. Декомпозиція пропускної спроможності терміналу. Техніко-технологічна система портового контейнерного терміналу складається з сукупності технічних засобів (перевантажувального обладнання різних категорій), які

формують технологічні лінії для проведення вантажних робіт. На пропускну здатність терміналу впливають безліч факторів:

- параметри підхідних каналів, що забезпечують введення та виведення суден із порту;
- кількість, конструкція, технічний стан та глибини діючих причалів терміналу;
- ступінь технічного оснащення (кількість, типи, вантажопідйомність перевантажувальних машин та пристроїв);
- кількість, місткість, конструкція та розташування складів;
- технологія перевантажувальних робіт тощо.

Декомпозиція пропускної спроможності контейнерного терміналу з урахуванням результатів структурно-функціонального аналізу дозволяє уявити її формування у вигляді наступної схеми (рис. 1).

Отже, пропускна спроможність терміналу $R(X, t)$ формується як поєднання продуктивностей (пропускної спроможності) технологічного обладнання причалів:

$$R(X, t) = \sum_{i=1}^n R_i(x_i, t), \quad (1)$$

де $R_i(x_i, t), i = \overline{1, n}$ – пропускна спроможність (продуктивність технологічного обладнання) i -го причалу; $x_i, i = \overline{1, n}$ – параметри, які характеризують продуктивність технологічного обладнання причалу; $\tilde{O} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ – параметри, які характеризують елементи техніко-технологічної системи терміналу – складові технологічного обладнання. У свою чергу, продуктивність технологічного обладнання причалів залежить від продуктивності відповідного технологічного устаткування:

$$R_i(x_i, t) = C_i(x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)), \quad (2)$$

де $\tilde{N}_i$ – функція, яка описує залежність пропускної спроможності i -го причалу контейнерного терміналу від продуктивності складу технологічного обладнання та устаткування; $x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)$ – кількість обладнання на i -причалі; $x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)$ – відповідно, продуктивності технологічного устаткування причалу.

Таким чином, сукупність параметрів $\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}$ визначає пропускну спроможність контейнерного терміналу.

Отже, з урахуванням викладеного вище, шляхом декомпозиції отримаємо наступні умови сталого функціонування портового контейнерного терміналу як техніко-технологічної системи:

$$P((R'_i(x_i', t) - R^f_i(x_i^f, t) \leq \Delta R'_i(t)) \geq p_{\gamma i}), \quad (3)$$

$$i = \overline{1, n}, t = 1, 2, 3, \dots, T,$$

де $R'_i, \Delta R'_i$, відповідно, планова продуктивність (пропускна спроможність) та її припустиме зменшення для i -ого причалу, R^f_i – фактична пропускна спроможність.

Умови (3) інтерпретуються наступним чином: у кожний момент часу ймовірність того, що пропускна спроможність причалу терміналу вище, ніж певний рівень p_{ji} , який можна вважати достатнім для забезпечення сталого функціонування. В свою чергу, забезпечення виконання (3) потребує виконання аналогічних умов для параметрів, які характеризують продуктивність кожного елементу зі складу техніко-технологічного обладнання кожного причалу.

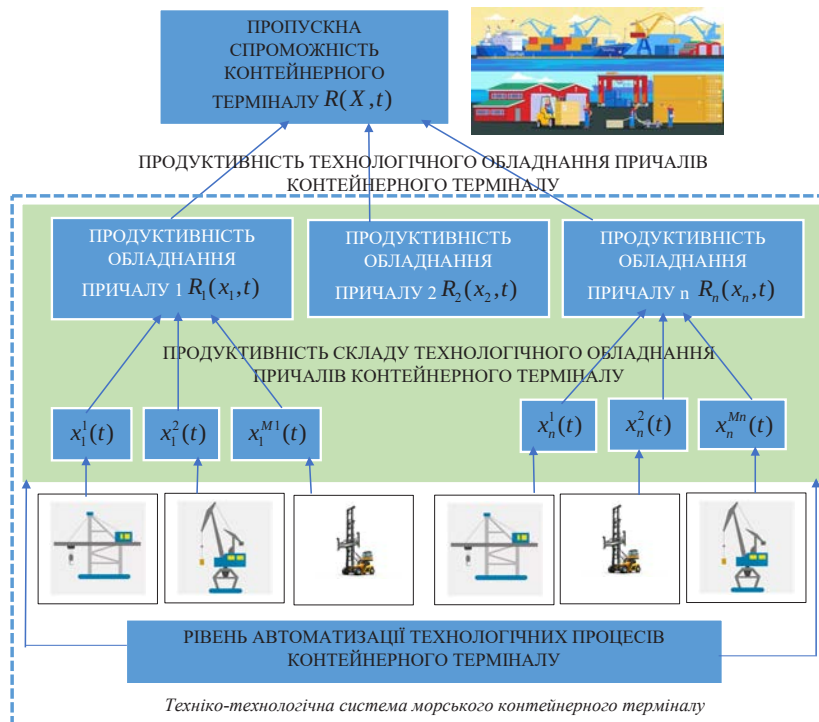


Рис. 1. Пропускна спроможність контейнерного терміналу як інтегральна характеристика відповідної техніко-технологічної системи

Слід зазначити, що ключова роль при забезпеченні певного рівня продуктивності технологічних комплексів причалів належить порталним контейнерним перевантажувачам, тому що саме вони здійснюють безпосередньо процес розвантаження/навантаження суден. Інше обладнання та устаткування має більш мобільний характер, тому, якщо для окремих їх елементів порушується стале функціонування, це, як правило, не призводить до порушення сталого функціонування технологічного комплексу причалу та терміналу у цілому. Тому для забезпечення виконання умови (2.24), перш за все, необхідним є забезпечення сталого функціонування порталних контейнерних перевантажувачів.

З урахуванням даного факту умови сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу слід звзяти, не розглядаючи усі елементи, а тільки основні, у даному випадку – причальних контейнерних перевантажувачів.

Нехай серед елементів множини $\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}$ виділено підмножину параметрів, які характеризують продуктивність портальних контейнерних перевантажувачів. Не обмежуючи загальності, приймаємо:

$$\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\} \subset \bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}, \quad (4)$$

де $P((x_i^{L_i}(t) - x_i^{f_k}(t)) \leq \Delta x_i^{L_i}(t)) \geq p_{ik}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, t = 1, 2, \dots, T$ – кількість причальних контейнерних перевантажувачів i -го причалу. До даної множини також можна додати ще тилові контейнерні перевантажувачі, якщо вони для даного терміналу грають також вагому роль та досить сильно впливають на пропускну спроможність терміналу. У будь якому випадку, стає функціонування терміналу на практиці залежить не від усіх складових техніко-технологічної системи, а тільки від її підмножини, яку необхідно визначити з урахування особливості терміналу.

Отже, дані умови:

$$P((x_i^{L_i}(t) - x_i^{f_k}(t)) \leq \Delta x_i^{L_i}(t)) \geq p_{ik}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, t = 1, 2, \dots, T, \quad (5)$$

де $x_i^{L_i}(t)$ – планова продуктивність k -го устаткування з множини основних; $x_i^{f_k}(t)$ – фактична продуктивність k -го устаткування з множини основних; $\Delta x_i^{L_i}(t)$ – припущення відхилення фактичної продуктивності k -го устаткування з множини основних від запланованого рівня; p_{ik} – ймовірність забезпечення необхідного рівня продуктивності.

Метод оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу. На зменшення фактичних значень параметрів

$\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}$ та відповідних ймовірностей p_{ik} впливає множина факторів. Отже, під ризиком сталого функціонування морського контейнерного терміналу будемо розуміти порушення умови (5).

Для оцінки ризику порушення сталого функціонування пропонується наступний метод, який базується на існуючих підходах для оцінки ризиків у різних сферах (наприклад, [17]), розвиваючи їх з урахуванням сутності та прийнятих критеріїв сталого функціонування, а також з врахуванням галузевої специфіки.

У відповідності до попередньої декомпозиції пропускну спроможності, оцінка ризику сталого функціонування терміналу в цілому передбачає покроковий розгляд ризику функціонування технологічного комплексу певного причалу, а також ризику функціонування певного технологічного обладнання (рис. 2) – враховуючи декомпозицію пропускну спроможності терміналу та умови його сталого функціонування. Такий підхід враховує певний вплив устаткування та причалів на загальну пропускну спроможність терміналу.

Отже, S – ризик порушення сталого функціонування контейнерного терміналу в контексті порушення сталого функціонування відповідної техніко-технологічної системи, який формується на базі ризиків порушення сталого функціонування

технологічних комплексів причалів $S_i, i = \overline{1, n}$, що у свою чергу, є результатом композиції ризиків порушення параметрів продуктивності основних елементів технологічного комплексу причалу $S_i^k, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}$.

Пропонується загальний ризик порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу оцінювати як:

$$S = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot S_i, \quad (6)$$

де $\mu_i, i = \overline{1, n}$ – вага ризику порушення сталого функціонування кожного причалу у загальному ризику для терміналу у цілому. В якості даних важелів доцільним є використання частки планованої пропускної спроможності причалу $R'_i(x'_i)$ у загальній пропускній спроможності терміналу $R'(x')$ – в такий спосіб враховується диференціація впливу кожного причалу на функціонування терміналу:

$$\mu_i = \frac{R'_i(x'_i)}{R'(x')} = \frac{R'_i(x'_i)}{\sum_{i=1}^n R'_i(x'_i)}, i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

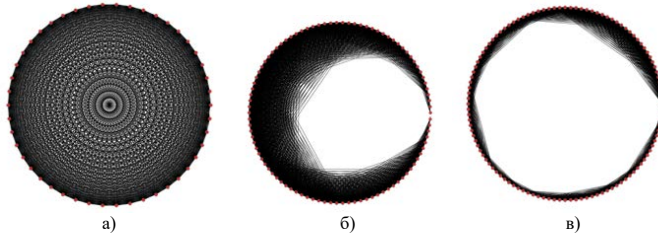


Рис. 2. Етапи оцінки ризику сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу

З урахуванням (7) виконується стандартна умова щодо важелів:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i = \sum_{i=1}^n \frac{R'_i(x'_i)}{R'(x')} = 1. \quad (8)$$

В свою чергу, врахування нерівнозначності впливу кожного елементу з множини $\{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}, i = \overline{1, n}$ також потребує введення відповідних важелів $\eta_i^k, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, L_i}$, для яких виконується умова:

$$\sum_{k=1}^{L_i} \eta_i^k = 1, i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Слід зазначити, що якщо в якості основного устаткування причалу в рамках множини $\{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}, i = \overline{1, n}$ враховуються, наприклад, тільки порталні

контейнерні перевантажувачі, то для встановлення важелів $\eta_i^k, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, L_i}$ можна використовувати підхід, аналогічний розглянутому вище, отже:

$$\eta_i^k = \frac{x_i^k}{R_i'(x_i')}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{L_i} \eta_i^k = \frac{\sum_{k=1}^{L_i} x_i^k}{R_i'(x_i')} = 1, i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

якщо прийнято, що

$$R_i'(x_i') \approx \sum_{k=1}^{L_i} x_i^k = 1, i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

отже пропускна спроможність причалу встановлюються як сума продуктивності основного устаткування (портальний перевантажувачів). Отже, (10) враховує внесок продуктивності кожного елементу з основних у технологічному устаткуванні причалу в продуктивність – пропускну спроможність причалу.

Якщо в множині $\{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}, i = \overline{1, n}$ присутні різноманітне устаткування, або умова (12) не виконується, то важелі $\eta_i^k, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, L_i}$ призначаються експертним шляхом з урахуванням впливу кожного елементу на загальну продуктивність.

Ризик порушення сталого функціонування технологічного комплексу причалів у даній ситуації:

$$S_i = \sum_{k=1}^{L_i} S_i^k \cdot \eta_i^k = 1, i = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Таким чином, формалізована інтегральна оцінка ризику порушення сталого функціонування контейнерного терміналу, яка враховує нерівнозначність впливу продуктивності основного обладнання причалів терміналу. Узагальнюючи (12) та (6), отримаємо:

$$S = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \left(\sum_{k=1}^{L_i} S_i^k \cdot \eta_i^k \right). \quad (14)$$

Якщо важелі $\mu_i, \eta_i^k, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, L_i}$ встановлюються у відповідності до (7) та (10), то оцінка ризику:

$$S = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \left(\sum_{k=1}^{L_i} S_i^k \cdot \eta_i^k \right) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i'(x_i')}{R'(x')} \left(\sum_{k=1}^{L_i} S_i^k \cdot \frac{x_i^k}{R_i'(x_i')} \right). \quad (15)$$

Таким чином, оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу формується як інтегральна величина ризиків іншого рівня у відповідності до схеми на рис. 2.

Формування оцінок ризику порушення сталого функціонування для складових техніко-технологічної системи терміналу. Наступний етап

дослідження – встановлення безпосередньо оцінок ризику S_i^k , на яких базуються ризики інших рівнів. На рис. 3 наведено схему пропонованого методу у загальному вигляді.

Отже, серед основних факторів впливу на продуктивність елементів транспортно-технологічної системи терміналу – зовнішні та внутрішні фактори. Основні зовнішні фактори: природно-кліматичні, техногенні, доступність енергоресурсів, запасних частин тощо; основні внутрішні фактори: старіння, знос обладнання, порушення правил та норм експлуатації, порушення норм проведення ремонтів та заміни обладнання, людський фактор (помилки, некомпетентність).

Перелічені фактори не є рівнозначними, отже деякі з них мають більш суттєвий вплив, ніж інші. Наприклад, як правило, вік та знос устаткування важливіше, ніж природно-кліматичні фактори. Традиційним підходом в такій ситуації є введення важелів, які враховують «вагу впливу». Нехай $\lambda_g^c, g = \overline{1,3}$ важелі для зовнішніх факторів впливу, $\lambda_w^d, w = \overline{1,5}$ – для внутрішніх. Для вказаних важелів необхідно виконання умови:

$$\sum_{g=1}^3 \lambda_g^c + \sum_{w=1}^5 \lambda_w^d = 1 \quad (16)$$

Встановлення даних важелів має відбуватися експертним шляхом з врахуванням досвіду певного терміналу, наявної статистики, поточних умов його роботи. Також слід зазначити, що встановлену систему факторів можна розглядати більш детально, отже кожен фактор можна уявити у вигляді цілої множини, наприклад, розподілити «наявність ресурсів» за видами ресурсів. Тем не менш, слід зауважити, що ступінь деталізації факторів не впливає на подальше дослідження. Тому приймаємо систему факторів впливу як на рис. 3.

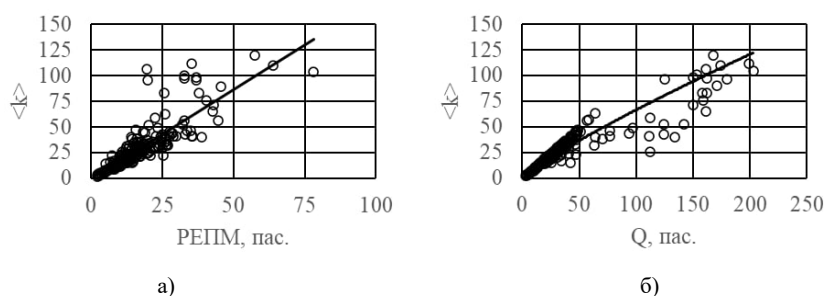


Рис. 3. Схема врахування факторів впливу для оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи морського контейнерного терміналу

На наступному кроці слід зазначити, що оцінка ризику відбувається для кож-

ної продуктивності $\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}$ з множини основного устаткування, при цьому важелі вважаються однаковими за значеннями для вказаного устаткування та обладнання. Тем не менш, можливо також використовувати варіант

диференціації важелів для різних категорій обладнання, або для різних причалів терміналу, якщо існує принципова різниця в умовах їх роботи (розташування причалу, людські ресурси тощо).

Оцінка впливу кожного фактору проводиться експертним шляхом – в якості експерту має виступати спеціаліст, якій володіє інформацією щодо технічного обладнання терміналу, його експлуатації та т.п. Оцінка впливу кожного фактору:

$$0 \leq s_{ikg}^c \leq 1, g = \overline{1,3}, 0 \leq s_{ikw}^a \leq 1, w = \overline{1,5}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, \quad (17)$$

де s_{ikg}^c , s_{ikw}^a – оцінки ризику впливу на продуктивність x_i^{fk} системи зовнішніх та внутрішніх факторів.

Загальна оцінка ризику з точки зору продуктивності $x_i^{fk}(t)$:

$$S_i^k = \sum_{g=1}^3 \lambda_g^3 \cdot s_{ikg}^3 + \sum_{w=1}^5 \lambda_w^e \cdot s_{ikw}^e, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}. \quad (18)$$

Таким чином, поєднання схем на рис. 3.1 та 3.2 формує послідовність розрахунків для оцінки ризику сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу.

Для того, щоб оцінка ризику мала практичне значення, необхідним є введення «шкали ризику», яка диференціює ризик на рівні (наприклад, [1]). Введення такої шкали в рамках даного дослідження можливо тільки у загальному вигляді без чіткого встановлення певних значень межі різних рівнів ризику. Це обумовлюється тим, що рівні ризику залежать від суб'єктивних оцінок важелів факторів впливу, які є актуальними для певного терміналу та можуть значно відрізнятися для іншого, з урахуванням його специфіки. Тому для практичного використання запропонованого методу кожен термінал формує відповідний розподіл рівнів ризику:

$S^1 \leq S \leq 1$ – рівень ризику високий;

$S^2 \leq S < S^1$ – рівень ризику середній;

$S^3 \leq S < S^2$ – рівень ризику помітний;

$S^4 \leq S < S^3$ – рівень ризику низький.

Після ідентифікації рівня ризику та порівняння його та відповідного значення ризику для попереднього періоду часу, формуються висновки та розробляються відповідні заходи для протидії зростаючому ризику, наприклад, або для підтримки наявного рівня сталого функціонування.

Експериментальні розрахунки. Для ілюстрації розрахунків за запропонованим методом розглянемо наступний приклад. Нехай розглядається термінал, у складі якого три причали з відповідним технологічним устаткуванням. Серед основного устаткування виділено по три елементу (табл. 1).

Розрахунки важелів продуктивності устаткування $\eta_i^k, i = \overline{1,3}, k = \overline{1,4}$ та причалів $\mu_i, i = \overline{1,3}$ за формулами (7), (10) наведено у табл.3.1. Пропускна спроможність терміналу 820 тис. TEU/рік – причали відповідно мають пропускні спроможності 260, 260 та 300 тис. TEU/рік. Рис.4 ілюструє прийняті важелі λ_g^c, λ_w^a для системи факторів впливу, табл. 2 – розрахунки для причалу 2.

Таблиця 1

Результати розрахунків важелів $\eta_i^k, i = \overline{1,3}, k = \overline{1,4}, \mu_i, i = \overline{1,3}$

	Причал 1		Причал 2		Причал 3	
	$\tilde{\sigma}_1^k$	$\tilde{\sigma}_2^k$	$\tilde{\sigma}_2^k$	η_2^k	$\tilde{\sigma}_3^k$	η_3^k
k=1	50	0,19	60	0,23	80	0,27
k=2	80	0,31	60	0,23	80	0,27
k=3	80	0,31	40	0,15	60	0,20
k=4	50	0,19	100	0,38	80	0,27
Разом	260	1,00	260	1,00	300	1,00
μ_i	0,317		0,317		0,366	



Рис. 4. Порівняння прийнятих важелів λ_g^c, λ_w^a

Результати розрахунку ризиків S_2^k для причалу 2

На рис. 5 наведено оцінки ризиків щодо зменшення продуктивності устаткування за причалами $S_i, i = \overline{1,3}$, на рис.6 – оцінки ризиків порушення сталого функціонування по причалах $S_i, i = \overline{1,3}$ та для терміналу у цілому S .

Кращий показник відповідає третьому причалу, з урахуванням того, що за найбільш вагомими складовими – станом устаткування, порушеннями ремонтів, норм експлуатації – цей причал має більш низькі оцінки.

Розрахунок ризику порушення сталого функціонування терміналу відбувався у відповідності до формули (14), таким чином, отримали оцінки ризику $S = 0,148$.

Якщо прийняти в якості шкали ризику сталого функціонування наступну:

$0,7 \leq S \leq 1$ – рівень ризику високий;

$0,5 \leq S < 0,7$ – рівень ризику середній;

$0,2 \leq S < 0,5$ – рівень ризику помітний;

$0 \leq S < 0,2$ – рівень ризику низький,

то для прикладу, що розглядається, рівень ризику вважається як низький. Але для повноти висновків необхідно мати інформацію за попередні часові періоди для порівняння та встановлення динаміки.

Таблиця 2

Фактори впливу	Оцінки ризику				Оцінки ризику з урахуванням важелів			
	$S_{21g}^{\zeta,\hat{a}}$	$S_{22g}^{\zeta,\hat{a}}$	$S_{23g}^{\zeta,\hat{a}}$	$S_{24g}^{\zeta,\hat{a}}$	$\lambda_{11g}^{\zeta,\hat{a}} \cdot S_{11g}^{\zeta,\hat{a}}$	$\lambda_{12g}^{\zeta,\hat{a}} \cdot S_{12g}^{\zeta,\hat{a}}$	$\lambda_{13g}^{\zeta,\hat{a}} \cdot S_{13g}^{\zeta,\hat{a}}$	$\lambda_{14g}^{\zeta,\hat{a}} \cdot S_{14g}^{\zeta,\hat{a}}$
Природно-кліматичні	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Техногенні	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Доступність ресурсів	0,2	0,2	0,15	0,15	0,02	0,02	0,015	0,015
Старіння, знос обладнання	0,3	0,3	0,8	0,5	0,06	0,06	0,16	0,1
Порушення правил та норм експлуатації	0,2	0,2	0,1	0,1	0,05	0,05	0,025	0,025
Порушення норм проведення ремонтів	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Людський фактор	0,1	0,05	0,1	0,05	0,01	0,005	0,01	0,005
Разом					0,1535	0,1485	0,2235	0,1585

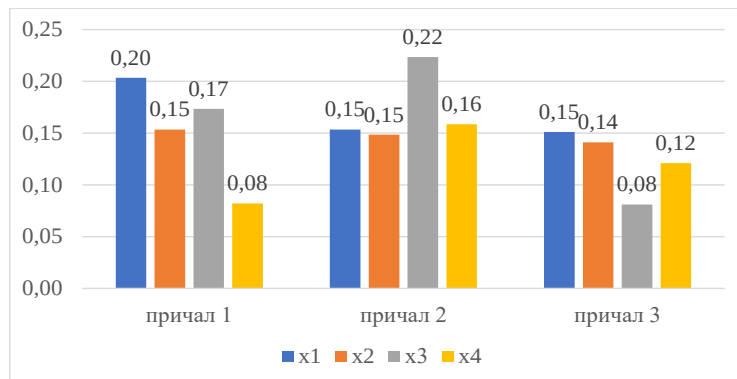


Рис. 5. Оцінки ризиків щодо зменшення продуктивності устаткування за причалами S_i^k

В процесі експериментальних розрахунків здійснювалось варіювання вхідними даними для аналізу впливу змін на результати оцінки ризику. Отже, результати експериментальних розрахунків за запропонованим методом дозволяють зробити висновок про те, що результати оцінки відповідним чином реагують на зміни вхідних даних; результати складають практичний інструмент оцінки ризику та надають наочний погляд на ситуації з ризиком порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу з точки зору окремих елементів даної системи.

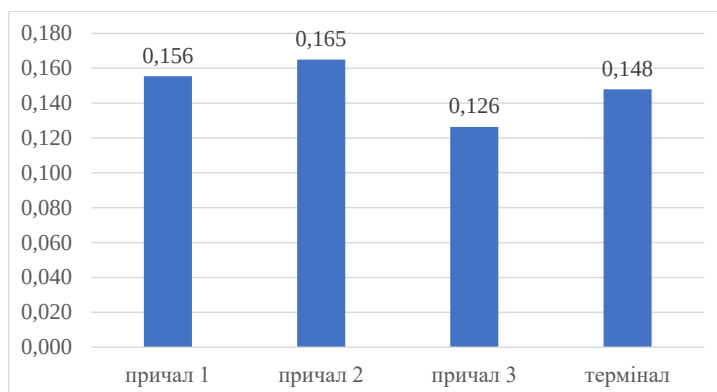


Рис. 6. Оцінки ризику порушення сталого функціонування причалів S_i та терміналу S

Висновки. Запропоновано метод оцінки ризику порушення сталого функціонування контейнерного терміналу у контексті його техніко-технологічної системи. Оцінка ризику сталого функціонування терміналу в цілому передбачає покроковий розгляд ризику функціонування технологічного комплексу певного причалу, а також ризику функціонування певного технологічного обладнання – враховуючи декомпозицію пропускну спроможності терміналу та умови його сталого функціонування. Такий підхід враховує певний вплив устаткування та причалів на загальну пропускну спроможність терміналу. Запропонований метод базується на існуючих підходах для оцінки ризиків у різних сферах, розвиваючи їх з урахуванням сутності та прийнятих критеріїв сталого функціонування, а також у прикладному напрямку з врахуванням галузевої специфіки при формуванні системи факторів впливу, а також при формалізації важелів елементів (устаткування) та підсистем (причалів) у структурі загального (інтегрального) ризику порушення сталого функціонування терміналу. Проведено відповідні експериментальні розрахунки з метою перевірки працездатності запропонованого методу та його достовірності.

Слід зазначити, що даний метод є універсальним, і може бути використаний для оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічних систем різних за спеціалізацією терміналів з врахуванням відповідної специфіки при визначенні множини устаткування та їх впливу на загальну пропускну здатність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kyrylova O., Kyrylova V. The oretical foundations of spatial and functional evolution of ports. *Транспортні системи і технології*. 2022. 1. 170-189. DOI: 10.32703/2617-9040-2022-40-15.
2. Решетков Д.М., Онищенко С. П., Павлова Н. Л., Кириллова В. Ю. Сутність, переваги та проблеми автоматизації контейнерних терміналів морських портів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34 (73) № 2. С. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/33

3. Kon W.K., Rahman N.S., Hanafiah R.M. Hamid S.A. The global trends of automated container terminal: A systematic literature review. *Maritime Business Review*. 2020. 6. P. 206–233
4. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю., Магамадов О.Р., Ромах В.Л. Smart port: новітні технології і міжнародний досвід їх упровадження. *Transport development*. 2024. С.62-74. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.06.
5. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022, 116, DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14
6. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, Том 35 2024. (74), № 1. С. 139-146.
7. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. Vol. 1(12), P. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10
8. Гнатієнко О., Дружинін В. Сучасні тенденції забезпечення функціональної стійкості складних організаційних систем. *Управління розвитком складних систем*. 2025. (60), 13–17. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.13-17
9. Висоцька І.Б. Теоретичні підходи до поняття «стійкість системи». *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ. Серія економічна*. 2017. Випуск 2. С. 13-23.
10. Mogylevych D. , Sboiev R. Analysis of functional safety of electronic communication system equipment. *Collection Information technology and security*. 2023. N11. 96-105. DOI: 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283816.
11. Барабаш О., Макарьчук А., Саланда І. Дослідження ймовірного показника функціональної стійкості розподілених інформаційних систем. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. N1. С. 45–50. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-6
12. Собчук В.В. Основи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем підприємств в умовах впливу дестабілізуючих факторів: монографія / В.В. Собчук, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко. К: Міленіум. 2022. 272 с.
13. Калашник Г., Калашник-Рибалко М. Ознаки та критерії функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання сучасного повітряного судна та перспективні напрямки його розвитку. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. С. 7-15. DOI: 10.30748/zhups.2021.68.01.
14. Мелешенко К. Забезпечення сталого функціонування вантажопасажирських поромів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.22.01 / К. Мелешенко; Одес. нац. мор. ун-т. – О., 2018. – 27 с.
15. Haraldson, Sandra & Lind, Mikael & Raza, Zeeshan & Woxenius, Johan & Olindersson, Fredrik. The concept of the sustainable port -ports becoming

enablers of sustainability in transports and logistics. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.35250.99526.

16. Hossain, Tahazzud & Adams, Michelle & Walker, Tony. Role of sustainability in global seaports. *Ocean & Coastal Management*. 2021. 202. DOI: 105435. 10.1016/j.ocescoaman.2020.105435.
17. Бичковський Ю.В., Онищенко С.П. Оцінка безпеки при проектно-орієнтованому управлінні безпекою в судноплаванні з урахуванням впливу індивідуальних факторів людського елемента. *Наукові інновації та передові технології*, 2025. 3(31), 381-393. DOI: 10.52058/2786-5274-2024-3(31)-381-393.

REFERENCES

1. Kyryllova O., Kyryllova V. The oretical foundations of spatial and functional evolution of ports. Transport systems and technologies. 2022. 1. 170-189. DOI: 10.32703/2617-9040-2022-40-15. [in Ukrainian]
2. Reshetkov D.M., Onyshchenko S. P., Pavlova N. L., Kyryllova V. Y . The essence, advantages and problems of automation of container terminals of sea ports. [Sutnist', perevahy ta problemy avtomatyzatsiyi konteynernykh terminaliv mors'kykh portiv]. Scientific notes of the Tavria National University V.I. Vernadsky [Vcheni zapysky Tavriys'koho natsional'noho universytetu imeni V.I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky]. 2023. 34 (73) № 2. P. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/3[in Ukrainian]
3. Kon W.K., Rahman N.S., Hanafiah R.M. Hamid S.A. The global trends of automated container terminal: A systematic literature review. *Maritime Business Review*. 2020. 6. P. 206–233
4. Kirillova O.V., Kirillova V.Yu., Magamadov O.R., Romakh V.L. Smart port: latest technologies and international experience of their implementation. [Smart port: novitni tekhnolohiyi i mizhnarodnyy dosvid yikh uprovadzhennya] *Transport development*. 2024. P.62-74. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.06. [in Ukrainian]
5. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022, 116, DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14
6. Bondarenko Yu.A., Onyshchenko S. P. Structure and uncertainty of container flows in the maritime transport system [Struktura ta nevyznachenist' konteyneropotokiv u systemi mors'kykh perevezen'] *Academic notes of the Tavri National University V.I. Vernadskyi, Series: Technical Sciences, Volume 35 (74), No. 1, 2024, pp. 139-146. [in Ukrainian]*
7. Berestenko V., Onyshchenko S. Probability characteristics of multimodal delivery [Ymovirnisni kharakterystyky mul'tymodal'noyi dostavky]. *Transport development*. 2021. Vol. 1(12), P. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10 [in Ukrainian]
8. Hnatienko O., Druzhynin V. Modern trends in ensuring the functional stability of complex organizational systems [Suchasni tendentsiyi zabezpechennya funktsional'noyi stiykosti skladnykh orhanizatsiynykh

- system]. Management of the development of complex systems. 2025. (60), 13–17. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.13-17 [in Ukrainian]
9. Vysotska I.B. Theoretical approaches to the concept of "system stability" [Teoretychni pidkhody do ponyattya «stiykist' systemy»] []. Scientific Bulletin of the Lviv State University of Internal Affairs. Economic Series. 2017. Issue 2. P. 13-23 [in Ukrainian]
 10. Mogylevych D. , Sboiev R. Analysis of functional safety of electronic communication system equipment. Collection Information technology and security. 2023. N11. 96-105. DOI: 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283816.
 11. Barabash O., Makarchuk A., Salanda I. Research of the probabilistic indicator of the functional stability of distributed information systems [Doslidzhennya ymovirnisnogo pokaznyka funktsional'noyi stiykosti rozpodilenykh informatsiynykh system]. Measuring and computing devices in technological processes. 2024. N1. C. 45–50. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-6 [in Ukrainian]
 12. Sobchuk V.V. Fundamentals of ensuring the functional stability of information systems of enterprises under the influence of destabilizing factors: monograph [Osnovy zabezpechennya funktsional'noyi stiykosti informatsiynykh system pidpryemstv v umovakh vplyvu destabilizuyuchykh faktoriv:] / V.V. Sobchuk, O.V. Barabash, A.P. Musienko. K: Millennium. 2022. 272 p. [in Ukrainian]
 13. Kalashnik G., Kalashnik-Rybalko M. Signs and criteria of functional stability of the integrated complex of on-board equipment of a modern aircraft and promising directions of its development [Oznaky ta kryteriyi funktsional'noyi stiykosti integrovanooho kompleksu bortovoho obladnannya suchasnoho povitryanoho sudna ta perspektyvni napryamky yoho rozvytku.]. Collection of scientific papers of the Kharkiv National University of the Air Force. 2021. S. 7-15. DOI: 10.30748/zhups.2021.68.01 [in Ukrainian]
 14. Meleshenko K. Ensuring sustainable operation of cargo-passenger ferries [Zabezpechennya staloho funktsionuvannya vantazhopasazhyr's'kykh poromiv:]: autoref. thesis for obtaining sciences. degree of doctor of technology Sciences: specialist 05.22.01 / K. Meleshenko; Odessa national plague Univ. – O., 2018. – 27 p. [in Ukrainian]
 15. Haraldson, Sandra & Lind, Mikael & Raza, Zeeshan & Woxenius, Johan & Olindersson, Fredrik. The concept of the sustainable port -ports becoming enablers of sustainability in transports and logistics. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.35250.99526.
 16. Hossain, Tahazzud & Adams, Michelle & Walker, Tony. Role of sustainability in global seaports. *Ocean & Coastal Management*. 2021. 202. DOI: 105435. 10.1016/j.ocecoaman.2020.105435.
 17. Bychkovsky Y.V., Onyshchenko S.P. Safety assessment in project-oriented safety management in shipping taking into account the influence of individual factors of the human element [Otsinka bezpeky pry proyektno-oriyentovanomu upravlinni bezpekoyu v sudnoplavstvi z urakhuvannyam vplyvu indyvidual'nykh faktoriv lyuds'koho elementa]. Scientific Innovations and Advanced Technologies, 2025. 3(31), 381-393. DOI: 10.52058/2786-5274-2024-3(31)-381-393. [in Ukrainian].