

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-26>

УДК 004.94:658.5

Марценюк Василь Петрович<sup>1</sup>, д.т.н., професор

<https://orcid.org/000-0001-5622-1038>

Кіт Наталія Василівна<sup>2</sup>, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-9096-4393>

<sup>1</sup>Університет в Бельсько Бяла, м. Бельсько Бяла, Польща

<sup>2</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБНИЧИХ МЕРЕЖ

**Марценюк В.П., Кіт Н.В. Аналітичний огляд підходів до проектування виробничих мереж.** В даній статті проведено аналітичний огляд публікацій по проектуванню виробничої мережі, зокрема його актуальності на сучасних виробництвах, а також проблемами, які виникають при транспортуванні сировини між логістично-виробничими вузлами. Проведено аналіз робіт по роках в наукометричній базі Scopus. Представлено авторів, які опублікували найбільшу кількість робіт, включаючи країни та навчальні заклади. А також, які саме види публікацій найбільше публікували та у якій галузі науки був до них найбільший інтерес. Представлено спонсорські фонди, які зробили найбільший вклад у видавництво даних наукових робіт. Під час проектування виробничої мережі часто виникають проблеми логістики, зокрема такі моменти, як визначення найбільш вигідних місць для розміщення виробництва об'єктів, складів і розподільних вузлів для зниження транспортних витрат, зменшити терміни доставки, а також ефективно задоволення потреб і запитів споживачів. Для вирішення проблем, які виникають під час транспортування сировини між логістичними ділянками розроблено решітчасту модель на прямокутній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із затримкою.

**Ключові слова:** проектування виробничої мережі, Індустрія 4.0, кіберфізична система, решітчаста модель, Scopus

**Martsenyuk V., Kit N. Analytical review of approaches manufacturing networks design.** This article provides an analytical review of publications on the manufacturing network design, particularly its relevance in modern production, as well as the problems that arise during the transportation of raw materials between logistics and production sites. An analysis of works by year in the scientometric database Scopus was carried out. The authors who have published the largest number of works are represented, including countries and educational institutions. Also, what types of publications were published the most and in which field of science there was the greatest interest in them. The sponsoring funds that made the biggest contribution to the publication of these scientific works are presented. During the manufacturing network design, logistics problems often arise such points as determining the most profitable places for the location of production facilities, warehouses and distribution centers to reduce transportation costs, reduce delivery times, as well as effectively meet the needs and requests of consumers. To solve the problems that arise during the transportation of raw materials between logistics areas, a lattice model on a rectangular grid using lattice differential equations with a delay has been developed.

**Keywords:** manufacturing network design, Industry 4.0, cyber-physical system, lattice model, Scopus

**Постановка проблеми.** З розвитком технологій та впровадженням в них Індустрії 4.0 зросла потреба у проектуванні виробничих мереж та автоматизації виробничих процесів. І хоч ця тема є на даний момент дуже актуальною, особливо протягом останнього десятиліття, бо все більше виробництв зацікавлені у автоматизації, але залишається мало дослідженою. Найменш дослідженою є тема проблем, які виникають при транспортуванні сировини між логістично-виробничими ділянками. Для того, щоб аналіз був якісним та проаналізовані дослідження були новаторськими та якісними, відповідно це не можливо зробити без попередньо вивченого та проаналізованого матеріалу на дану тематику. І саме повноцінним вирішенням даної проблеми буде через глибокий аналітичний огляд літературних джерел. В даний момент це питання можна оптимізувати за рахунок використання інформаційних пошукових систем, такий як Scopus. Також для вирішення проблем, які виникають під час транспортування сировини між логістичними ділянками буде дуже доречно розробити решітчасту модель на прямокутній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із затримкою.

**Аналіз відомих результатів досліджень.** Проектування виробничої мережі має вирішальне значення, оскільки визначає оптимальне розміщення виробничих і логістичних потужностей, впливаючи на ефективність витрат, рівень обслуговування клієнтів і відіграє ключову роль у забезпеченні організації ефективної конкуренції у все більш складній та взаємопов'язаній глобальній економіці [1]. У цьому процесі приймаються важливі рішення, пов'язані з розташуванням, пропускнуою спроможністю, логістикою та розгортанням технологій у мережі, враховуючи такі фактори, як вартість, якість, швидкість і гнучкість [2]. Це дозволяє компаніям

стратегічно позиціонувати свою діяльність, щоб задовольнити попит, мінімізувати витрати та швидко адаптуватися до мінливих умов ринку [3].

Кіберфізичні системи (КФС) вважаються наступним кроком у еволюції постійного вдосконалення та інтеграції функцій у рамках Industry 4.0. Напівавтономні та автономні рішення є життєво важливими компонентами Industry 4.0, де IoT, штучний інтелект (ШІ), нові інтегровані системи, розширена аналітика та інші технології відіграють важливу роль [4-6].

Огляд проектування виробничих систем у взаємодії Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0., а також виробниче мислення та методи моделювання розглянуто у статті [7], розкриття потужності промислового штучного інтелекту для Індустрії 5.0: ідеї, шляхи та виклики в [8]. Розглянуто людино-орієнтовані системи в інтелектуальному виробництві[9], а також управління операціями та інформаційні системи для інтелектуального виробництва[10]. Тему штучного інтелекту для людино-кіберфізичних виробничих систем розкрито в [11]. Моделювання, проектування та симуляція як послуга на основі розширеної реальності (XR) в Індустрії 4.0 розглянуто в [12] та штучний інтелект для управління виробництвом і контролю на шляху до масової персоналізації глобальних мереж у [13].

У роботах [14] розглянуті підходи до проведення аналітичного пошуку літературних джерел по різних наукових тематиках в наукометричних базах Scopus та WoS.

**Мета роботи:** Провести аналітичний огляд публікацій по проектуванню виробничої мережі за останнє десятиліття, зокрема його актуальності на сучасних виробництвах, а також проблемами, які виникають при транспортуванні сировини між логістично-виробничими ділянками. Провести аналіз робіт по роках в наукометричній базі Scopus, який буде включати авторів, країни, навчальні заклади, а також спонсорські фонди, які зробили найбільший вклад у даному напрямку. Розглянути, які саме види публікацій найбільше видавалися та у якій галузі науки був до них найбільший інтерес. Для вирішення проблем, які виникають під час транспортування сировини між логістичними ділянками запропонувати решітчасту модель на прямокутній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із затримкою

**Аналітичний огляд.** Використання комп'ютерної програми Scopus дає можливість оптимізувати релевантний пошук наукової літератури з проблеми, яка є первинною. Для того, щоб оцінити актуальність досліджень про проектування виробничої мережі в наукометричній базі Scopus було сформульовано аналітичний запит TITLE-ABS-KEY ( "manufacturing" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "network" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "design" )

За результатами пошуку в наукометричній базі Scopus спостерігаємо зростання кількості публікацій протягом останніх десяти років. Це також додатково підтверджує високий науковий інтерес до досліджуваної тематики, а саме проектування виробничої мережі та автоматизації виробничих процесів.

На пошуковий запит по даній темі в наукометричній базі Scopus знайдено 15980 наукових праць з 1942 до 2025 року, з них 9112 з 2014 по 2024 роки, тобто, за останнє десятиріччя. Найбільша кількість літературних джерел по досліджуваній тематиці припадає на останні 3 роки. Зокрема в 2022 році було опубліковано 1230 публікацій, 2023 – 1333, 2024 – 1100 , що підтверджує актуальність дослідження даної проблеми та невпинне зростання інтересу до неї в усьому світі (рис. 1).

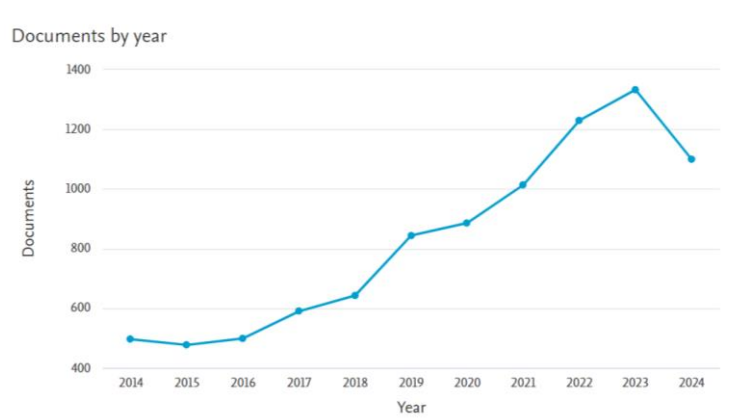


Рис. 1. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus (загальна кількість праць за роками)

Найбільше публікацій було видано у таких виданнях, як Proceedings Of SPIE The International Society For Optical Engineering(142), Proceedings Electronic Components And Technology Conference (105), Procedia CIRP (98 International Journal Of Advanced Manufacturing Technology (93), IEEE Access(91). Що свідчить про те, що багато міжнародних видань публікують статті на дану тематику та зацікавлені у її розвитку.

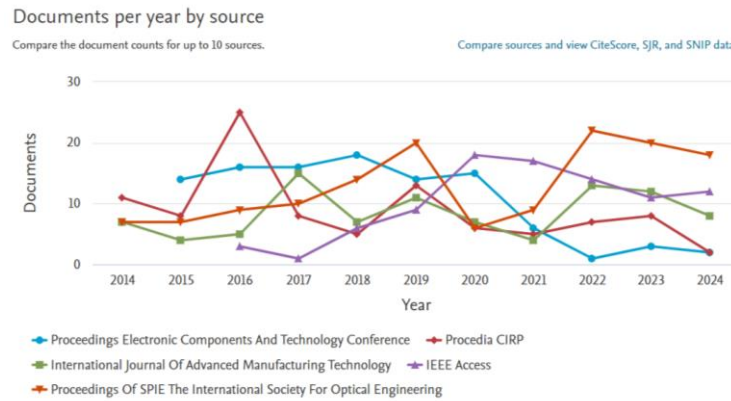


Рис. 2. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus (публікації за рік по виданнях)

Щодо основних авторів, то лідерство мають такі науковці, як Mourtzis, D. – 33, Schuh, G. – 16, Chahal, P. та Lanza, G. по 13 публікацій, Doukas, M. – 12, Chakrabarty, K. та Yu, B. по 11 публікацій, Franke, J. та Simpson, T.W. по 10 публікацій та Allen, J.K., кількість праць якого найбільша – 9 (рис. 3).

### Documents by author

Compare the document counts for up to 15 authors.

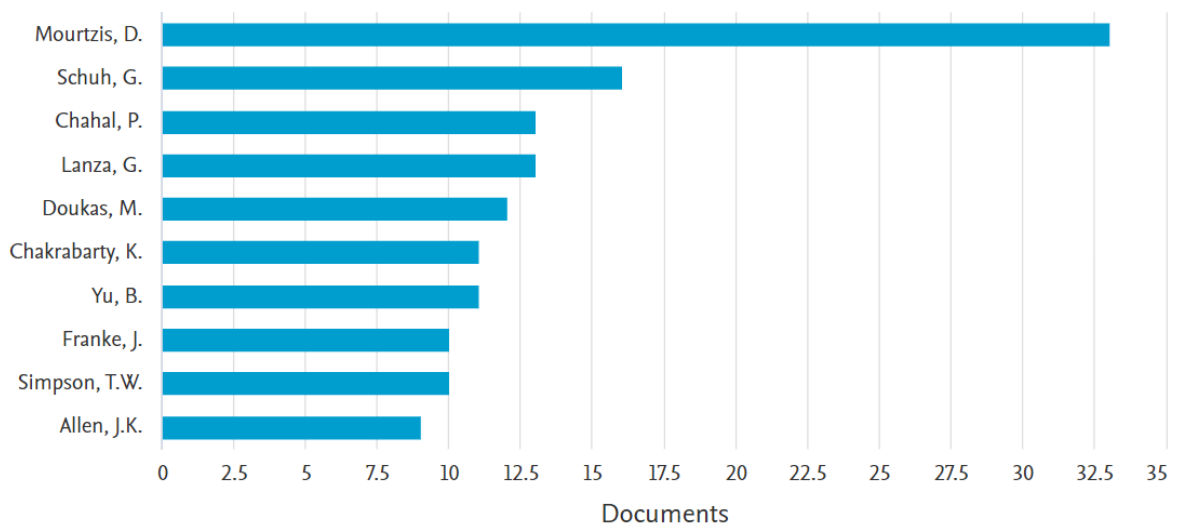


Рис. 3. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus (автори)

На рис. 4 наведено результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus серед наукових закладів.

### Documents by affiliation

Compare the document counts for up to 15 affiliations.

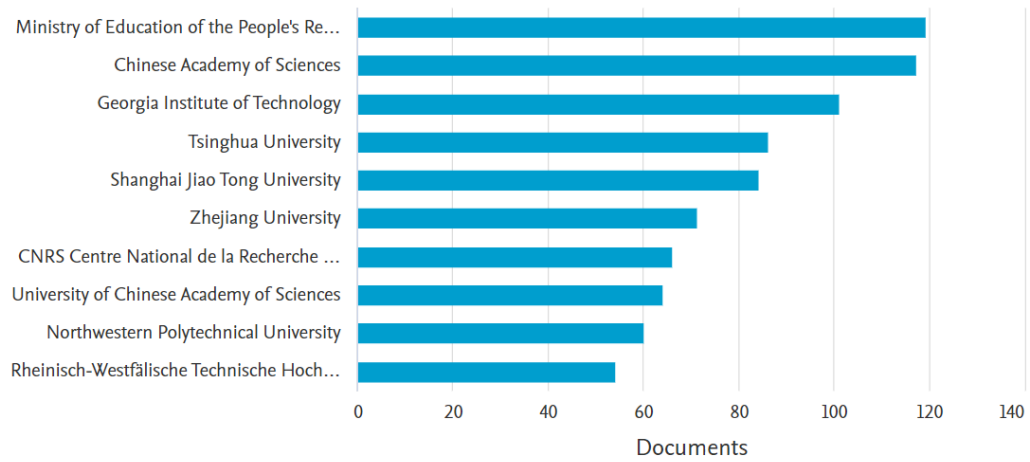


Рис. 4. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus (наукові заклади)

Серед наукових закладів найбільша кількість у Ministry of Education of the People's Republic of China-119, Chinese Academy of Sciences – 117, Georgia Institute of Technology – 101, Tsinghua University – 86, Shanghai Jiao Tong University – 84.

Аналіз серед країн показав, що кількість публікацій найбільше у Китаї – 1984, США – 1779, Індія – 817, Німеччині – 615, Об'єднаному Королівстві – 554 та Австралія – 357. Що свідчить про те, що велика кількість наукових досліджень публікується у різних країнах світу та вони зацікавлені у проектуванні виробничих мереж, що допомагає автоматизувати їхні виробництва (рис. 5).

### Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

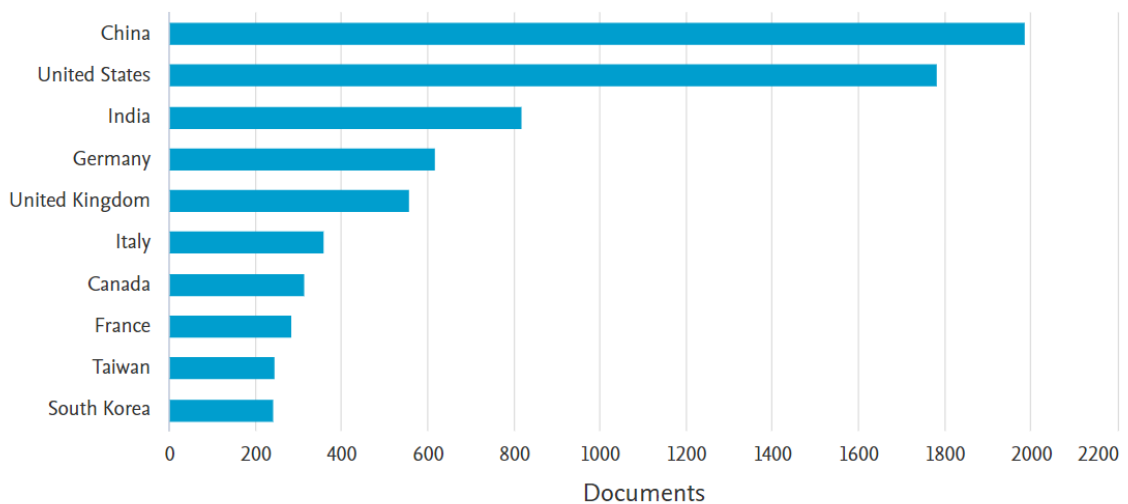


Рис. 5. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus (країни)

Серед наукових праць переважали дослідницькі статті в журналах (53,4%), тези конференцій (31,5%), огляди конференцій (6,4%), оглядові статті (3,9%), та розділи в монографіях (3,8%) (рис. 6).

### Documents by type

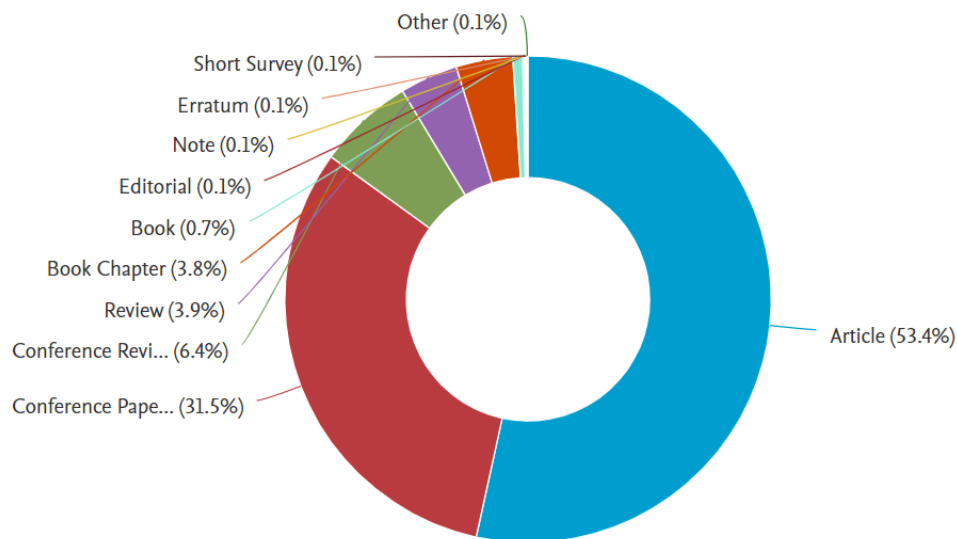


Рис. 6. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus(види публікацій)

Розглядаючи предметні галузі можна сказати, що найбільша кількість наукових публікацій належить до інженерії (29,8%), комп'ютерних наук (20,2%), матеріалознавство (8,9%), математики (6,9%), фізики та астрономії(6,6%) та бізнесу, менеджмент і бухгалтерському обліку (5,1%) (рис.7).

### Documents by subject area

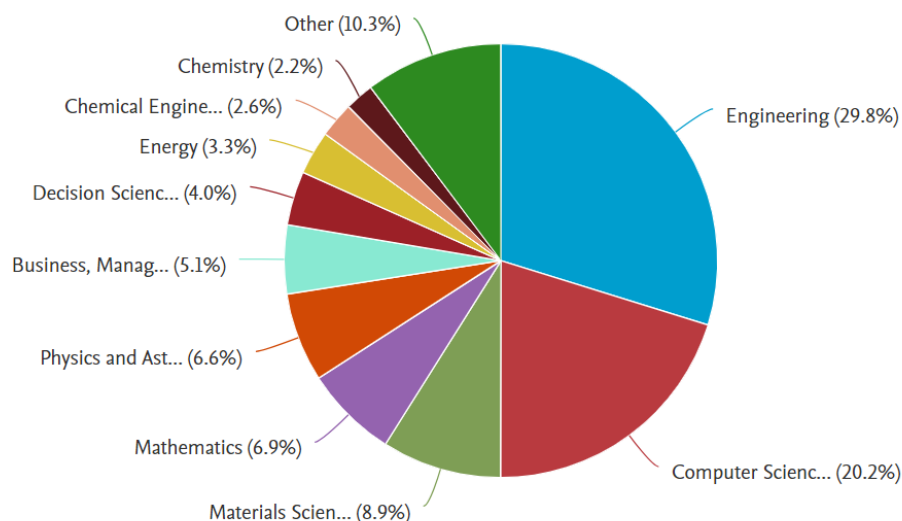


Рис. 7. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus(предметні галузі)

На рис. 8 наведено результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus по спонсорських фондах.

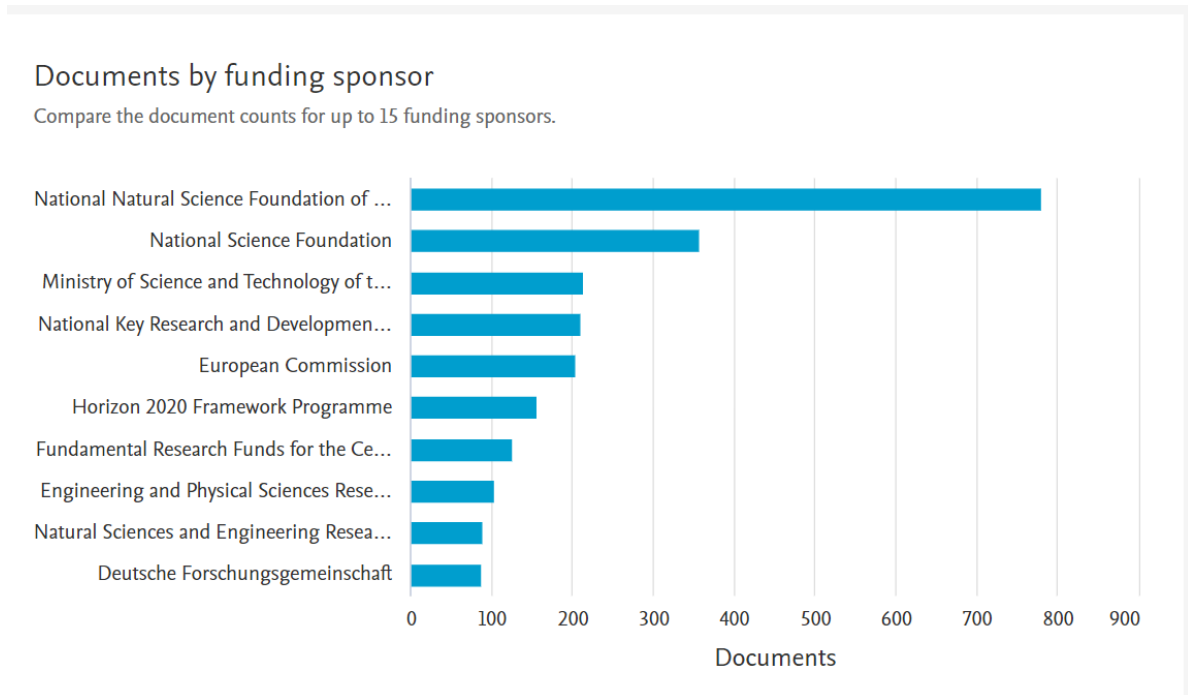


Рис. 8. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus(спонсорські фонди)

Спонсорські фонди, які зробили найбільший вклад у видавництво даних наукових робіт є National Natural Science Foundation of China – 779, National Science Foundation – 356, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China-213, European Commission – 203, Horizon 2020 Framework Programme – 155.

**Проектування решітчастої моделі.** Наведена нижче модель розроблена для проблем проектування виробничих мереж, що виникають під час транспортування сировини між логістичними вузлами на прямокутній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із затримкою.

Термінологія моделі походить з [15]. Модель базується на ряді припущень. Припустимо, що виробнича мережа включає в себе логістично-виробничі вузли, які розташовані у вузлах прямокутної решітки  $(i, j)$ ,  $(i, j) = \overline{1, N}$ . Нехай для  $t$ , в даний момент часу,  $V_{i,j}(t)$  є ресурсами, які використовуються для виробництва продукту  $i$  в даний час розташовані на вузлі, в свою чергу,  $F_{i,j}(t)$  є готовим продуктом, який виробляється і зберігається на  $(i, j)$ .

Модель враховує наступні параметри процесів виробництва і транспортування для довільного логістично-виробничого вузла  $(i, j)$ :

1. Ресурси з'являються (можуть бути «видобуті») всередині виробничого вузла з імовірністю  $\beta > 0$ .

2. На виготовлення одиниці продукції потрібно  $\gamma > 0$  одиниць ресурсу.

3. Використання ресурсу обмежено за допомогою коефіцієнта  $\delta_v > 0$ , який дозволяє нам прагнути до рівня пропускної здатності для  $V_{i,j}(t)$ .

4. Припустимо, що передача ресурсів може бути можлива з чотирьох сусідніх вузлів  $(i-1, j)$ ,  $(i+1, j)$ ,  $(i, j-1)$ ,  $(i, j+1)$  (Рис. 1) з вершинами  $D_{i,j}^{i-1,j} \Delta^{-2}$ ,  $D_{i,j}^{i+1,j} \Delta^{-2}$ ,  $D_{i,j}^{i,j-1} \Delta^{-2}$ ,  $D_{i,j}^{i,j+1} \Delta^{-2}$  де  $D_{i,j}^{k,m} > 0$ ,  $i, j, k, m = \overline{1, n}$  і  $\Delta > 0$  - це відстань між вузлами.

5. Виробництво може бути забраковано з імовірністю  $\mu_f > 0$ .

6. В результаті затримок і неврахованих наслідків ми спостерігаємо збільшення вартості ресурсу, необхідного для виробництва продукції, до рівня ймовірності  $\eta\gamma$ .

7. Виробництво прагне до певної пропускної здатності з імовірністю  $\delta_f > 0$ .

8. Нехай  $\tau > 0$  — час, необхідний для виготовлення одиниці продукції.

З наведених припущень ми розглядаємо приріст вартості ресурсів у вузлі  $(i, j)$  протягом часу  $\Delta t$ :  $\Delta V_{i,j}(t) = V_{i,j}(t + \Delta t) - V_{i,j}(t)$  з урахуванням наступних припущень:

- а) збільшення на величину  $\beta V_{i,j}(t)\Delta t$ , що викликано «видобутком» нового ресурсу;
- б) зменшення на величину  $-\gamma F_{i,j}(t-\tau)V_{i,j}(t)\Delta t$ , що пояснюється ресурсами, необхідними для виробництва продукції у вузлі  $(i, j)$  в момент  $(t-\tau)$ ;
- в) збільшення вартості  $-\Delta\delta_v V_{i,j}(t-\tau)V_{i,j}(t)\Delta t$  внаслідок пропускнуої здатності ресурсів.

Кількість продуктів у вузлі  $(i, j)$  також залежить від розподілу сировини між чотирма сусідніми вузлами, що враховується при обчисленні просторового оператора  $\hat{S}\{V_{i,j}(t)\}\Delta t$  у вигляді (4).

Виходячи з наведених вище припущень, збільшення кількості ресурсів  $\Delta V_{i,j}(t)$  у вузлі  $(i, j)$  за певний проміжок часу можна записати у вигляді  $\Delta V_{i,j}(t)\Delta t$ .

Розділивши ліву і праву частини всього рівняння на  $\Delta t$  і додавши  $\Delta t \rightarrow 0$ , отримаємо рівняння для визначення кількості сировинних ресурсів  $V_{i,j}$ ,  $t > 0$ .

$$\frac{dV_{i,j}}{dt} = \beta V_{i,j}(t) - \gamma F_{i,j}(t-\tau)V_{i,j}(t) - \delta_v V_{i,j}(t-\tau)V_{i,j}(t) + \hat{S}\{V_{i,j}(t)\} \quad (1)$$

Зростання продукції у вузлі  $(i, j)$  за період часу  $\Delta t$  становить

$$\Delta F_{i,j}(t) = F_{i,j}(t + \Delta t) - F_{i,j}(t)$$

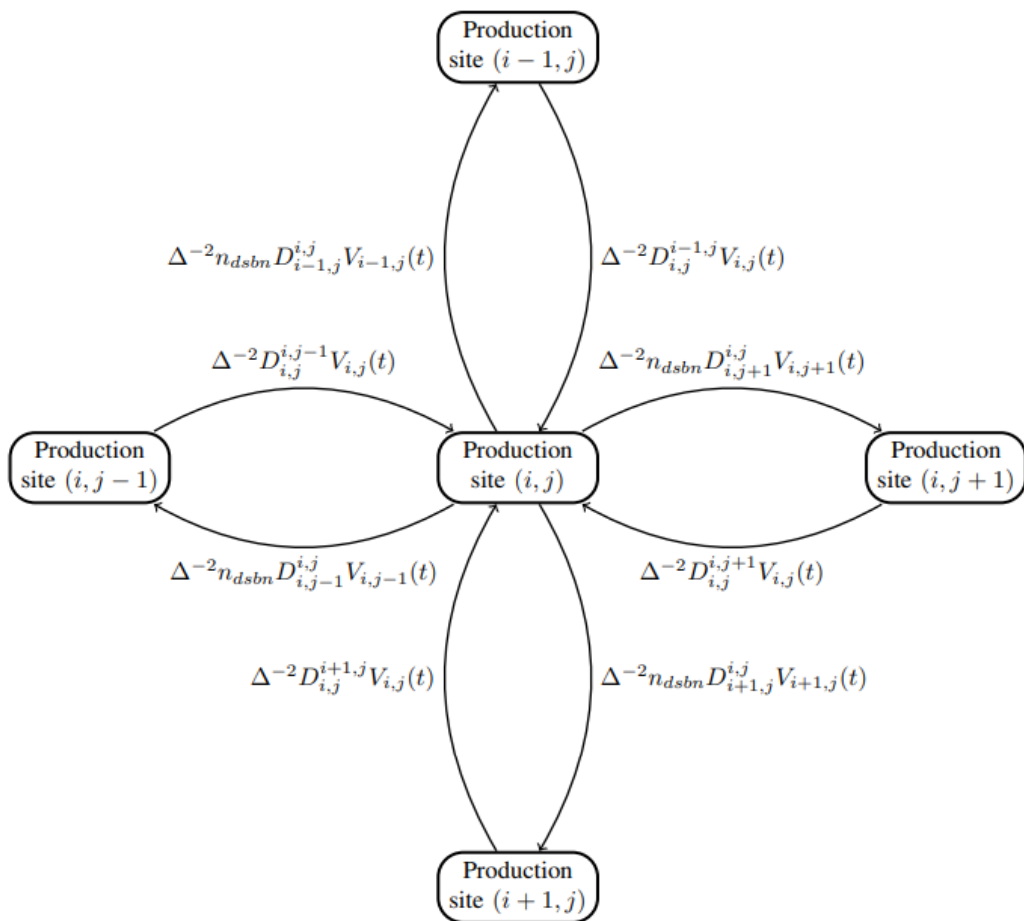


Рис. 9. Квадратна решітка, яка представляє собою чотири сусідні логістично-виробничі вузли

Згідно з припущеннями, зазначеними вище, наступні аналоги впливають на зміну продукту на виробничому вузлі  $(i, j)$  за період часу  $\Delta t$ :

а) зменшується на значення  $-\mu_f F_{i,j}(t)\Delta t$  за рахунок кількості бракованих виробів;

б) збільшення на величину  $\eta \mathcal{W}_{i,j}(t-\tau)F_{i,j}(t)\Delta t$ , яка визначається ресурсами, необхідними для виробництва одиниці продукції в момент часу  $(t-\tau)$  ( $\tau$  - значення затримки (час, витрачений на виробництво одиниці продукції));

в) зменшення на величину  $-\delta_f F_{i,j}^2(t)\Delta t$ , що викликано зниженням швидкості виготовлення нових виробів  $\delta_f$  у зв'язку з наближенням їх до межі насичення.

З наведених причин зростання продуктів  $\Delta F_{i,j}(t)$  у вузлі  $(i, j)$  за період часу  $\Delta t$  можна записати як  $\Delta F_{i,j}(t) = -\mu_f F_{i,j}(t)\Delta t + \eta \mathcal{W}_{i,j}(t-\tau)F_{i,j}(t)\Delta t - \delta_f F_{i,j}^2(t)\Delta t, t > 0$ .

Розділивши ліву і праву частини останнього рівняння на  $\Delta t$  з напрямком  $\Delta t \rightarrow 0$ , отримуємо рівняння для визначення кількості продукції:

$$\frac{dF_{i,j}}{dt} = (-\mu_f + \eta \mathcal{W}_{i,j}(t-\tau) - \delta_f F_{i,j}(t))F_{i,j}(t), t > 0 \quad (2)$$

Оператор (4) включає в себе константу  $n_{dsbn}$ , яка описує можливі дисбаланси між вхідними та вихідними потоками сировини.

Кожен вузол піддається впливу ресурсів, вироблених на чотирьох сусідніх вузлах – по два вузла в кожному напрямку, розділених однаковою відстанню  $\Delta$ .

$$\hat{S}\{V_{i,j}\} = \begin{cases} \Delta^{-2} \left[ D_{1,2}^{1,1} V_{1,2} + D_{2,1}^{1,1} V_{2,1} - n_{dsbn} D_{1,1}^{1,2} V_{1,1} - n_{dsbn} D_{1,1}^{2,1} V_{1,1} \right] & i, j = 1 \\ \Delta^{-2} \left[ D_{2,j}^{1,j} V_{2,j} + D_{1,j-1}^{1,j} V_{1,j-1} + D_{1,j+1}^{1,j} V_{1,j+1} - n_{dsbn} D_{1,j}^{2,j} V_{1,j} - n_{dsbn} D_{1,j}^{1,j-1} V_{1,j} - n_{dsbn} D_{1,j}^{1,j+1} V_{1,j} \right] & i = 1, j \in \overline{2, N-1} \\ \Delta^{-2} \left[ D_{1,N-1}^{1,N} V_{1,N-1} + D_{2,N}^{1,N} V_{2,N} - n_{dsbn} D_{1,N}^{1,N-1} V_{1,N} - n_{dsbn} D_{1,N}^{2,N} V_{1,N} \right] & i = 1, j = N \\ \Delta^{-2} \left[ D_{i-1,N}^{i,N} V_{i-1,N} + D_{i+1,N}^{i,N} V_{i+1,N} + D_{i,N-1}^{i,N} V_{i,N-1} - n_{dsbn} D_{i,N}^{i-1,N} V_{i,N} - n_{dsbn} D_{i,N}^{i+1,N} V_{i,N} - n_{dsbn} D_{i,N}^{i,N-1} V_{i,N} \right] & i \in \overline{2, N-1}, j = N \\ \Delta^{-2} \left[ D_{N-1,N}^{N,N} V_{N-1,N} + D_{N,N-1}^{N,N} V_{N,N-1} - n_{dsbn} D_{N,N}^{N-1,N} V_{N,N} - n_{dsbn} D_{N,N}^{N,N-1} V_{N,N} \right] & i = N, j = N \\ \Delta^{-2} \left[ D_{N-1,j}^{N,j} V_{N-1,j} + D_{N,j-1}^{N,j} V_{N,j-1} + D_{N,j+1}^{N,j} V_{N,j+1} - n_{dsbn} D_{N,j}^{N-1,j} V_{N,j} - n_{dsbn} D_{N,j}^{N,j-1} V_{N,j} - n_{dsbn} D_{N,j}^{N,j+1} V_{N,j} \right] & i = N, j \in \overline{2, N-1} \\ \Delta^{-2} \left[ D_{N-1}^{N,1} V_{N-1,1} + D_{N,2}^{N,1} V_{N,2} - n_{dsbn} D_{N,1}^{N-1,1} V_{N,1} - n_{dsbn} D_{N,1}^{N,2} V_{N,1} \right] & i = N, j = 1 \\ \Delta^{-2} \left[ D_{i-1}^{i,1} V_{i-1,1} + D_{i+1}^{i,1} V_{i+1,1} + D_{i,2}^{i,1} V_{i,2} - n_{dsbn} D_{i,1}^{i-1,1} V_{i,1} - n_{dsbn} D_{i,1}^{i+1,1} V_{i,1} - n_{dsbn} D_{i,1}^{i,2} V_{i,1} \right] & i \in \overline{2, N-1}, j = 1 \\ \Delta^{-2} \left[ D_{i-1,j}^{i,j} V_{i-1,j} + D_{i+1,j}^{i,j} V_{i+1,j} + D_{i,j-1}^{i,j} V_{i,j-1} + D_{i,j+1}^{i,j} V_{i,j+1} - n_{dsbn} D_{i,j}^{i-1,j} V_{i,j} - n_{dsbn} D_{i,j}^{i+1,j} V_{i,j} - n_{dsbn} D_{i,j}^{i,j-1} V_{i,j} - n_{dsbn} D_{i,j}^{i,j+1} V_{i,j} \right] & i, j \in \overline{2, N-1} \end{cases} \quad (4)$$

Використовується гранична умова  $V_{i,j} = 0$  для індексів масиву  $i, j = 0, N+1$ .

**Висновки:** В даній статті проведено аналітичний огляд публікацій по проектуванню виробничої мережі, зокрема його актуальності на сучасних виробництвах. Проведено аналіз робіт по роках в наукометричній базі Scopus. Представлено авторів, які опублікували найбільшу кількість робіт, включаючи країни та навчальні заклади. А також, які саме публікації найбільше публікували та у якій галузі науки був до них найбільший інтерес. Представлено спонсорські фонди, які зробили найбільший вклад у видавництво даних наукових робіт. Згідно даних отриманих під час аналітичного огляду літературних джерел за допомогою програми у наукометричній базі Scopus можна зробити висновок, що є велика зацікавленість проблемою проектування виробничих мереж та тема є актуальною, і хоча протягом останнього десятиліття інтерес до неї лише зростає вона є мало дослідженою. А також, що велика кількість статей публікується у різних країнах світу, що



свідчить про те, що вони зацікавлені у проектуванні виробничих мереж та автоматизації виробництва.

Також для вирішення проблем, які виникають під час транспортування сировини між логістичними ділянками була розроблена та запропонована решітчаста модель на прямокутній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із затримкою, яка базується на ряді припущень та дозволяє визначити час, витрачений на виробництво одиниці продукції та уникнути проблем, які часто виникають при транспортуванні.

В подальших дослідженнях планується продовжувати досліджувати дану тематику, бо хоч вона і актуальна і до неї є інтерес, але вона ще мало досліджена наковцями, а також опублікувати результати чисельного моделювання решітчастої моделі на прямокутній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із затримкою.

#### Список використаних джерел

1. Jelena Milisavljevic-Syed, Janet K. Allen, Sesh Commuri, Farrokh Mistree, Design of networked manufacturing systems for Industry 4.0, *Procedia CIRP*, Volume 81, 2019, Pages 1016-1021, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.244>.
2. Mourtzis D., Doukas M., Psarommatis F., Manufacturing Network Design for Mass Customisation using a Genetic Algorithm and an Intelligent Search Method, *Procedia CIRP*, vol. 7, 2013, pp. 37–42 <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.007>
3. D. Mourtzis, E. Vlachou, N. Boli, L. Graviyas, C. Giannoulis, Manufacturing Networks Design through Smart Decision Making towards Frugal Innovation, *Procedia CIRP*, Volume 50, 2016, Pages 354-359, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.166>.
4. Kim, J. H. (2017). A Review of Cyber-Physical System Research Relevant to the Emerging IT Trends: Industry 4.0, IoT, Big Data, and Cloud Computing. In *Journal of Industrial Integration and Management* (Vol. 02, Issue 03, p. 1750011). World Scientific Pub Co Pte Lt. <https://doi.org/10.1142/s2424862217500117>
5. Mosterman, P.J., Zander, J. Industry 4.0 as a Cyber-Physical System study. *Softw Syst Model* 15, 17–29 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10270-015-0493-x>
6. Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.-A., & Lee, J. (2015). Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment. In *IFAC-PapersOnLine* (Vol. 48, Issue 3, pp. 1622–1627). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.318>
7. Leng, J., Guo, J., Xie, J., Zhou, X., Liu, A., Gu, X., Mourtzis, D., Qi, Q., Liu, Q., Shen, W., & Wang, L. (2024). Review of manufacturing system design in the interplay of Industry 4.0 and Industry 5.0 (Part I): Design thinking and modeling methods. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 76, pp. 158–187). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.07.012>
8. Leng, J., Zhu, X., Huang, Z., Li, X., Zheng, P., Zhou, X., Mourtzis, D., Wang, B., Qi, Q., Shao, H., Wan, J., Chen, X., Wang, L., & Liu, Q. (2024). Unlocking the power of industrial artificial intelligence towards Industry 5.0: Insights, pathways, and challenges. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 73, pp. 349–363). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.02.010>
9. Liu, S., Zhang, J., Yi, S., Gao, R., Mourtzis, D., & Wang, L. (2024). Human-centric systems in smart manufacturing from Industry 4.0 to Industry 5.0 (pp. 181–205). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13924-6.00006-5>
10. Mourtzis, D., & Sgarbossa, F. (2024). Operations management and information systems for smart manufacturing. In *Manufacturing from Industry 4.0 to Industry 5.0* (pp. 267–288). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13924-6.00009-0>
11. Mourtzis, D., & Angelopoulos, J. (2024). Artificial intelligence for human–cyber-physical production systems. In *Manufacturing from Industry 4.0 to Industry 5.0* (pp. 343–378). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13924-6.00012-0>
12. Mourtzis, D., Ong, S. K., Wang, X. V., Panopoulos, N., Stark, R., & Wang, L. (2024). Modelling, Design and Simulation as-a-Service Based on Extended Reality (XR) in Industry 4.0. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 99–143). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9_4)
13. Mourtzis, D., Panopoulos, N., Stavropoulos, P., & Papakostas, N. (2024). Artificial Intelligence for Production Management and Control Towards Mass Personalization of Global Networks. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 267–312). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9_8)
14. Abubakar, S. A., Sverstyuk, A. (2024). Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In *Computer systems and information technologies* (Issue 1, pp. 6–16). Khmelnytskyi National University. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-1-1>
15. Martsenyuk V.P., Sverstyuk A.S., Klos–Witkowska A., Kozodii N.V., Bagriy–Zayats O.A., Zubenko I.R. Numerical Analysis of Results Simulation of Cyber–physical Biosensor Systems. In 1st International Workshop Information–Communication Technologies&Embedded Systems. 14–15 November, Mykolaiv, 2019, Vol. 1. p. 149–164.

#### References

16. Jelena Milisavljevic-Syed, Janet K. Allen, Sesh Commuri, Farrokh Mistree, Design of networked manufacturing systems for Industry 4.0, *Procedia CIRP*, Volume 81, 2019, Pages 1016-1021, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.244>.

17. Mourtzis D., Doukas M., Psarommatis F., Manufacturing Network Design for Mass Customisation using a Genetic Algorithm and an Intelligent Search Method, *Procedia CIRP*, vol. 7, 2013, pp. 37–42 <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.007>
18. D. Mourtzis, E. Vlachou, N. Boli, L. Gravias, C. Giannoulis, Manufacturing Networks Design through Smart Decision Making towards Frugal Innovation, *Procedia CIRP*, Volume 50, 2016, Pages 354-359, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.166>.
19. Kim, J. H. (2017). A Review of Cyber-Physical System Research Relevant to the Emerging IT Trends: Industry 4.0, IoT, Big Data, and Cloud Computing. In *Journal of Industrial Integration and Management* (Vol. 02, Issue 03, p. 1750011). World Scientific Pub Co Pte Lt. <https://doi.org/10.1142/s2424862217500117>
20. Mosterman, P.J., Zander, J. Industry 4.0 as a Cyber-Physical System study. *Softw Syst Model* 15, 17–29 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10270-015-0493-x>
21. Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.-A., & Lee, J. (2015). Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment. In *IFAC-PapersOnLine* (Vol. 48, Issue 3, pp. 1622–1627). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.318>
22. Leng, J., Guo, J., Xie, J., Zhou, X., Liu, A., Gu, X., Mourtzis, D., Qi, Q., Liu, Q., Shen, W., & Wang, L. (2024). Review of manufacturing system design in the interplay of Industry 4.0 and Industry 5.0 (Part I): Design thinking and modeling methods. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 76, pp. 158–187). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.07.012>
23. Leng, J., Zhu, X., Huang, Z., Li, X., Zheng, P., Zhou, X., Mourtzis, D., Wang, B., Qi, Q., Shao, H., Wan, J., Chen, X., Wang, L., & Liu, Q. (2024). Unlocking the power of industrial artificial intelligence towards Industry 5.0: Insights, pathways, and challenges. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 73, pp. 349–363). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.02.010>
24. Liu, S., Zhang, J., Yi, S., Gao, R., Mourtzis, D., & Wang, L. (2024). Human-centric systems in smart manufacturing. In *Manufacturing from Industry 4.0 to Industry 5.0* (pp. 181–205). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13924-6.00006-5>
25. Mourtzis, D., & Sgarbossa, F. (2024). Operations management and information systems for smart manufacturing. In *Manufacturing from Industry 4.0 to Industry 5.0* (pp. 267–288). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13924-6.00009-0>
26. Mourtzis, D., & Angelopoulos, J. (2024). Artificial intelligence for human–cyber-physical production systems. In *Manufacturing from Industry 4.0 to Industry 5.0* (pp. 343–378). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13924-6.00012-0>
27. Mourtzis, D., Ong, S. K., Wang, X. V., Panopoulos, N., Stark, R., & Wang, L. (2024). Modelling, Design and Simulation as-a-Service Based on Extended Reality (XR) in Industry 4.0. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 99–143). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9_4)
28. Mourtzis, D., Panopoulos, N., Stavropoulos, P., & Papakostas, N. (2024). Artificial Intelligence for Production Management and Control Towards Mass Personalization of Global Networks. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 267–312). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9_8)
29. Abubakar, S. A., Sverstyuk, A. (2024). Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In *Computer systems and information technologies* (Issue 1, pp. 6–16). Khmelnytskyi National University. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-1-1>
30. Martsenyuk V.P., Sverstiuk A.S., Klos–Witkowska A., Kozodii N.V., Bagriy–Zayats O.A., Zubenko I.R. Numerical Analysis of Results Simulation of Cyber–physical Biosensor Systems. In *1st International Workshop Information–Communication Technologies&Embedded Systems*. 14–15 November, Mykolaiv, 2019, Vol. 1. p. 149–164.