

2. Choetkiertikul, M., Dam, H. K., Tran, T., Pham, T., Ghose, A., & Menzies, T. (2019). A deep learning model for estimating story points. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 45(7), 637–656. <https://doi.org/10.1109/TSE.2018.2792473>
3. Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *Proceedings of NAACL-HLT 2019*, 4171–4186. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>
4. Jørgensen, M., & Shepperd, M. (2007). A systematic review of software development cost estimation studies. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 33(1), 33–53. <https://doi.org/10.1109/TSE.2007.256943>
5. Kassem, H., Mahar, K., & Saad, A. A. (2023). Story point estimation using issue reports with deep attention neural network. *e-Informatica Software Engineering Journal*, 17(1), 1–15.
6. Porru, S., Murgia, A., Demeyer, S., Marchesi, M., & Tonelli, R. (2016). Estimating story points from issue reports. *Proceedings of the 12th International Conference on Predictive Models and Data Analytics in Software Engineering*. ACM. <https://doi.org/10.1145/2972958.2972959>
7. Reimers, N., & Gurevych, I. (2019). Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks. *Proceedings of EMNLP-IJCNLP 2019*, 3982–3992. <https://doi.org/10.18653/v1/D19-1410>
8. Yalçın, B., Dinçer, K., Karaçor, A. G., & Efe, M. Ö. (2024). Enhancing agile story point estimation: Integrating deep learning, machine learning, and natural language processing with SBERT and gradient boosted trees. *Applied Sciences*, 14(16), 7305. <https://doi.org/10.3390/app14167305>

## СИМУЛЯЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЦИФРОВІЙ ОСВІТІ

**Карпенко Микола Юрійович**

к. т. н., доцент

Кафедра інформаційних систем

Харківський національний економічний університет

імені Семена Кузнеця

Кафедра Комп'ютерних наук та інформаційних технологій

Харківський національний університет міського господарства

імені О. М. Бекетова, Україна

### **Анотація.**

Представлено математичну модель динамічної економічної системи з регульованими параметрами для дослідження механізмів формування економічної рівноваги в умовах взаємодії виробника, споживача та органу цінового регулювання. Модель враховує виробничі обмеження, функції корисності та динаміку ціноутворення, дає змогу аналізувати дисбаланси попиту

і пропозиції, умови їх компенсації та переходу системи до рівноважного стану. Розроблений підхід реалізовано у вигляді комп'ютерного тренажера для дистанційного навчання, що сприяє розвитку аналітичного мислення та практичних навичок економічного моделювання.

**Ключові слова:** економічна система; виробничі можливості; функція корисності; імітаційне моделювання; ціноутворення; дистанційна освіта.

**Введення.** Впровадження інформаційних технологій стало визначальною рисою сучасної освіти. Розвиток цифрових платформ і систем дистанційного навчання докорінно змінив підходи до підготовки фахівців, забезпечивши гнучкість, доступність та безперервність освіти незалежно від часу й місця навчання [1, 7].

Особливого значення дистанційна освіта набула в умовах воєнного стану, коли традиційні форми організації навчання зазнали суттєвих обмежень. За таких обставин цифрові технології стали основою збереження стабільності освітнього процесу, підтримки комунікації між учасниками навчання та забезпечення безперервного доступу до освітніх ресурсів [8–11].

Попри значні переваги, дистанційне навчання має низку проблем, як то недостатній рівень інтерактивності, обмежені можливості практичного відпрацювання навичок і складність повноцінного сприйняття навчального матеріалу через електронні канали комунікації [1, 3, 5, 6]. Одним із перспективних шляхів подолання цих обмежень є використання навчальних симуляторів, ділових ігор та систем імітаційного моделювання. Такі засоби дають змогу відтворювати реальні професійні ситуації, моделювати процеси прийняття рішень та формувати практичні компетентності в умовах, наближених до реальної діяльності [12].

Інтеграція імітаційних технологій у дистанційне навчання сприяє підвищенню ефективності засвоєння знань, розвитку аналітичного мислення та підготовці конкурентоспроможних фахівців, особливо в економічній та управлінській сферах, де практична складова професійної діяльності має вирішальне значення.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розроблення формалізованої математичної моделі економічної системи з керованими параметрами для дослідження механізмів досягнення економічної рівноваги та створення на її основі інтерактивних навчальних симуляторів.

Завдання дослідження:

- розробити математичну модель економічної системи з урахуванням взаємодії виробника, споживача та механізмів цінового регулювання;
- дослідити поведінку системи за різних співвідношень попиту й пропозиції та визначити механізми виникнення й усунення економічних дисбалансів;
- проаналізувати процеси переходу системи до рівноважного стану з урахуванням впливу нереалізованої продукції та відкладеного попиту;
- оцінити ефективність цінового регулювання як інструменту стабілізації економічної системи та підвищення точності моделювання ринкових процесів.

### Результати дослідження і їх обговорення.

Будемо розглядати економічну систему як взаємодію трьох компонент: виробники, споживачі та органи ціноутворення, алгоритми роботи яких формують траєкторію моделі [13, 14]. Можливості виробника описуються вектором:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}, X \geq 0, X \in W, \quad (1)$$

де  $n$  – номенклатура продукції;

$W$  – множина виробничих можливостей/

В системі діє вектор цін, що впливає на поведінку виробника та споживача. Завданням виробника є визначення обсягів виробництва відповідно до критерію максимізації доходу [15]:

$$P \times X \rightarrow \max, X \geq 0, X \in W. \quad (2)$$

Розв'язання (2) дозволяє знайти вектор  $X^*$ , при цьому дохід виробника становитиме  $C = P \times X^*$ .

Будемо вважати, що система замкнута, тобто сума  $C$  переходить до споживача. Останній формує вектор попиту:

$$Y^* = \{Y_1^*, Y_2^*, \dots, Y_n^*\}, \text{ за умови } P \times Y \leq C. \quad (3)$$

При визначенні попиту  $Y^*$  зі сторони сукупного споживача вирішується завдання максимізації корисності, а саме:

$$U(Y) \rightarrow \max, P \times Y \leq C, y \geq 0. \quad (4)$$

Тоді умову рівноваги можна представити як  $Y^* = X^*$ , з бюджетною лінією:.. При цьому бюджетна лінія  $B$ , що формує дві множини  $W$  і  $S$ , а саме

$$S = \{X \mid U(X) \geq U(X^*)\}. \quad (5)$$

Визначимо характерні ситуації [16] для моделі (16):

- дисбаланс між попитом та пропозицією:  $X^* \neq Y^*$ ;
- оптимальний вибір виробником номенклатури  $X^*$  менш цінний для споживача:  $U(X^*) < U(Y^*)$ ;
- потрібний споживачу обсяг номенклатури не може бути вироблений внаслідок виробничих обмежень.

Перелічені стани системи свідчать про виникнення економічного дисбалансу, зумовленого неефективною ціновою політикою, реалізованою на етапах вирішення завдань (2) та (4).

Будемо вважати, що споживачу невідомо  $X^*$ , при цьому його мета – задовольнити попит  $Y^*$ . Тоді обсяг виробництва становитиме:

$$\tilde{X} = \min_{i \in n} \{X_i^*, Y_i^*\}, \quad (6)$$

обсяг нереалізованих залишків складатиме  $\Delta X = X^* - \tilde{X} \geq 0$ , сума відкладеного попиту відповідно  $\Delta C = C - P \Delta X$ . Модель працює ітераційно. На кожній ітерації сума  $\Delta C$  накопичується та формує фонд відкладеного попиту.

Розглянемо роботу моделі з  $T$  ітерацій. На кожній ітерації формується вектор цін  $P(t)$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ . Початкові значення  $\Delta C(0) = 0$ ,  $\Delta X(0) = 0$ . На ітерації  $t$  пропозиція  $\hat{X}(t)$  становитиме:

$$\tilde{X}(t) = X^*(t) + \Delta X(t-1), \quad (7)$$

де  $\Delta X(t-1)$  – залишки від попереднього етапу,  $X^*(t)$  – додатковий обсяг випуску.

Обсяг попиту на ітерації  $t$  становитиме  $Y^*(t)$ , що є результатом розв'язання (2) для цін  $P(t)$ :

$$C(t) = P(t) X^*(t) + \Delta C(t-1), \quad (8)$$

де  $\Delta C(t-1)$  – відкладений попит на ітерації  $(t-1)$ .

Стан моделі на ітерації  $t$  виглядає як:

– обсяг реалізації

$$\tilde{X}(t) = \min \{ \hat{X}(t), Y^*(t) \}; \quad (9)$$

– нереалізовані залишки

$$\Delta X(t) = \hat{X}(t) - \tilde{X}(t); \quad (10)$$

– відкладений попит

$$\Delta C(t) = C(t) - P(t) \tilde{X}(t). \quad (11)$$

Розглянемо роботу моделі для  $n = 2$ . Відповідно до співвідношення попиту та пропозиції маємо чотири ситуації:

1.  $\Delta X_1 > 0, \Delta X_2 = 0$ ;
2.  $\Delta X_1 = 0, \Delta X_2 > 0$ ;
3.  $\Delta X_1 = \Delta X_2 = 0$ ;
4.  $\Delta X_1 > 0, \Delta X_2 > 0$ .

Розглянемо бюджету пряму  $PX = q$  де  $q$  – вартість номенклатури  $X$  у цінах  $P$ . Запишемо умову рівноваги  $q = C$ , враховуючи, що  $q = p(X^* + \Delta X)$ ,  $C = P \times X^* + \Delta C$ , де  $\Delta C$  – відкладений попит:

$$\Delta C = P \times \Delta X. \quad (12)$$

Якщо для поточних цін  $P(t)$  маємо ситуацію  $\Delta C \neq P \Delta X$ , для досягнення рівноваги доцільно ввести коефіцієнт коригування цін  $\rho$ . Тоді відповідне коригування положення бюджетної прямої можна представити як:  $\rho \cdot P \times X = C$ . У випадку занадто великих залишків потрібно вибирати  $\rho > 1$ . Коли обсяг пропозиції перевищує попит вибираємо  $\rho < 1$ . Точне значення  $\rho$  для досягнення рівноваги можна знайти як:

$$\eta = \frac{P \times X^* + \Delta C}{P \times X^* + P \Delta X}. \quad (13)$$

Розглянемо роботу з коефіцієнтом  $\rho$  в ситуаціях 3 та 4.

Ситуація 3. Попит більший за пропозицію,  $\Delta C > 0$ , залишки товарів нульові, відкладений попит позитивний. Вибираємо  $\rho = 1 + (\Delta C / (P X^*)) > 1$ , тобто зменшуємо відкладений попит через підвищення цін.

Ситуація 4. Пропозиція значно перевищує попит,  $\Delta C = 0$ . Вибираємо  $\rho < 1$ , тобто ініціюємо «тотальний розпродаж».

#### **Аналіз двовимірного випадку**

У даному випадку в системі присутні дві позиції номенклатури. Опис виробничих можливостей обмежимо виразом:

$$\frac{X_1^2}{a^2} + \frac{X_2^2}{b^2} = \mathbf{1}, \quad (14)$$

де  $a$  і  $b$  – максимально можливі обсяги виробництва продукції кожного типу. Бюджетну лінію, що дотична до еліпса (14) в точці  $(X_1^*, X_2^*)$  запишемо як:

$$\frac{X_1 X_1^*}{a^2} + \frac{X_2 X_2^*}{b^2} = \mathbf{1}, \quad (15)$$

тоді лінія цін  $P \times X = d$  має відповідати умові:

$$\frac{P_1 X_1}{d} + \frac{P_2 X_2}{d} = \mathbf{1}. \quad (16)$$

Виходячи з (15) та (16) отримаємо:

$$\frac{P_1}{d} = \frac{X_1^*}{a^2}, \quad \frac{P_2}{d} = \frac{X_2^*}{b^2}, \quad P_1 X_1^* + P_2 X_2^* = d, \quad (17)$$

а рішення (17) можна представити як:

$$d = \sqrt{P_1^2 a^2 + P_2^2 b^2}, \quad X_1^* = \frac{P_1 a^2}{d}, \quad X_2^* = \frac{P_2 b^2}{d}. \quad (18)$$

Розв'язок (18) дозволяє знайти вектор оптимального випуску та дохід  $d$ .

Моделювання поведінки споживача представимо у вигляді:

$$\frac{(Y_1 - O)^2}{a^2} - \frac{(Y_1 - O)^2}{(\alpha\beta)^2} = \mathbf{1}, \quad (19)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт споживчої переваги, а параметр  $O$  відповідає вимозі:  $O > a$ ,  $O > b$ .

Коефіцієнт споживчої переваги  $\beta$  дозволяє змоделювати відносну корисність одного продукту відносно другого, а саме:  $\beta = 1$  – товари є рівноцінними,  $\beta > 1$  – попит на перший товар більший, ніж на другий,  $\beta < 1$  попит на другий товар переважає попит на перший товар.

Умову балансування можна визначити як точку перетину прямої  $P_1 X_1 + P_2 Y_2 = C$  з одним із еліпсів (19), вирішивши систему рівнянь:

$$Y_1^* = -\frac{P_1 C}{P_1^2 + P_2^2 \beta^2} + O, \quad Y_2^* = -\frac{P_2 C \beta^2}{P_1^2 + P_2^2 \beta^2} + O. \quad (20)$$

Дослідження моделі свідчать, що досягнення економічної рівноваги в такій системі є можливим лише за умов узгодженості механізмів попиту, пропозиції та цінового регулювання. Через нелінійний характер взаємодії цих складових навіть незначні помилки у формуванні цін здатні суттєво змінювати траєкторію розвитку системи та посилювати її відхилення від рівноважного стану. Особливо критичними є ситуації, коли в системі вже існує дисбаланс, спричинений відкладеним попитом або надлишковою пропозицією. У такому випадку будь-які неточності цінового регулювання набувають ефекту накопичення та провокують подальше зростання структурних перекосів.

Встановлено, що за обмежених виробничих ресурсів і значного початкового відхилення від рівноваги система не здатна самостійно повернутися до

стабільного стану в короткостроковій перспективі. За таких умов важливим інструментом стабілізації виступає використання коефіцієнтів роздрібних цін, які виконують компенсаторну функцію та дозволяють коригувати напрям розвитку системи.

Встановлено, що за обмежених виробничих ресурсів і значного початкового відхилення від рівноваги система не здатна самостійно повернутися до стабільного стану в короткостроковій перспективі. За таких умов важливим інструментом стабілізації виступає використання коефіцієнтів роздрібних цін, які виконують компенсаторну функцію та дозволяють коригувати напрям розвитку системи.

У стані економічної рівноваги пропорційна зміна рівня цін сама по собі не призводить до порушення балансу між попитом і пропозицією. Однак за наявності вже сформованих диспропорцій — зокрема відкладеного попиту чи дефіциту окремих товарів — навіть незначні помилки у механізмах цінового регулювання можуть спричинити посилення нестабільності системи. У такій ситуації початкові відхилення поступово накопичуються та масштабуються, що призводить до зростання загального економічного дисбалансу й ускладнює повернення системи до рівноважного стану.

На основі розробленої моделі створено інтерактивний комп'ютерний тренажер, який імітує функціонування економічної системи з регульованими параметрами. У процесі роботи користувач задає початкові умови та параметри ціноутворення, після чого модель формує поведінку виробника і споживача з урахуванням виробничих обмежень, структури попиту та механізмів ринкової взаємодії. Виникнення дисбалансів відображається у вигляді нереалізованих товарних залишків або накопиченого відкладеного попиту.

Ітеративний характер роботи тренажера дозволяє аналізувати зміну станів системи в часі, оцінювати наслідки управлінських рішень і досліджувати ефективність різних стратегій цінового регулювання. Після завершення моделювання система формує послідовність дій та аналітичні результати, що створює підґрунтя для узагальнення отриманих даних і оцінювання ефективності прийнятих користувачем рішень.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження удосконалено підхід до побудови формалізованої математичної моделі економічної рівноваги, яка враховує механізми адаптивного цінового регулювання в умовах замкненого економічного середовища. На відміну від наявних підходів, запропонована модель орієнтована не лише на теоретичний аналіз економічних процесів, а й на практичне використання у складі інтерактивних навчальних систем дистанційної освіти. Це створює передумови для підвищення ефективності підготовки фахівців економічного та управлінського профілю шляхом поєднання теоретичного навчання з елементами імітаційного моделювання.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої моделі як основи для створення комп'ютерних тренажерів і навчальних симуляторів, призначених для дослідження процесів формування та підтримання

економічної рівноваги. Запропонований підхід дозволяє моделювати взаємодію виробника, сукупного споживача та механізмів цінового регулювання, аналізувати вплив змін попиту й пропозиції на стан системи та оцінювати ефективність управлінських рішень в умовах динамічного економічного середовища.

У роботі:

1. Розроблено модель динамічної економічної системи з регульованими параметрами, яка відтворює взаємодію ключових суб'єктів ринку в умовах замкненого економічного середовища.

2. Обґрунтовано доцільність використання запропонованої моделі як аналітичної основи для створення інтерактивних навчальних симуляторів у системах дистанційної освіти. Розроблений підхід дає змогу застосовувати модель як інструмент дослідження механізмів формування та підтримання економічної рівноваги, аналізу впливу нереалізованих залишків і відкладеного попиту на динаміку функціонування системи, а також вивчення особливостей її переходу до рівноважного стану.

3. Встановлено ключові умови формування економічних дисбалансів і проаналізовано механізми їх подолання, зокрема досліджено вплив нереалізованих товарних залишків та відкладеного попиту на характер функціонування системи й особливості її переходу до стану економічної рівноваги.

4. На підставі розробленої моделі проаналізовано передумови виникнення економічних дисбалансів, проілюстровано механізми їх компенсації.

5. Реалізація моделі у вигляді інтерактивного комп'ютерного тренажера та її впровадження до системи дистанційного навчання сприятиме розвитку аналітичних компетентностей здобувачів.

Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованої моделі як функціональної основи для створення інтерактивних компонентів дистанційних освітніх систем у процесі викладання економічних і управлінських дисциплін.

### Список використаних джерел

1. Vorotnykova, I. P. (2022). Distance and blended learning as a means of implementing an individual trajectory of teacher development. Kyiv University of Borys Hrinchenko. URL: [https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/41018/1/I\\_Vorotnykova\\_Monograph\\_2022\\_IPO.pdf](https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/41018/1/I_Vorotnykova_Monograph_2022_IPO.pdf)
2. Bilous, I. I., & Demianiuk, A. V. (2022). Modern educational technologies in the information society. *Innovative Pedagogy*, 54(1), 9–12. <https://doi.org/10.32782/2663-6085>
3. Zvarych, D. (2023). Theoretical concepts of distance learning. *Ukrainian Educational Journal*, 2, 115–124. <https://doi.org/10.32405/2411-1317-2023-2-115-124>
4. Luchaninova, O. P. (2022). Distance learning as a global educational trend: realities and prospects for higher education institutions of Ukraine. *Image of the Modern Pedagogue*, 1, 66–70. [https://doi.org/10.33272/2522-9729-2022-1\(202\)-5-10](https://doi.org/10.33272/2522-9729-2022-1(202)-5-10)

5. Artiushyn, L. M. (2023). Distance learning: analysis of concepts, advantages, problems and development prospects. *Telecommunication and Information Technologies*, 1, 34–41. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2023.047383>
6. Kondratiuk, O. V., Diatlenko, O. M., & Honcharenko, P. M. (2023). Educational process in Ukraine: Challenges, problems, trends. *Academic Visions* 38, 79–92. URL: <https://www.academy-vision.org/index.php/av/article/view/360>
7. Kyrylenko, V. I., & Chaliuk, Y. O. (2022). Assessment of Country Readiness for Dstance Learning. *Pryazovskyi Economic Herald*, 1(30), 24–33. <https://doi.org/10.32840/2522-4263/2022-1-4>
8. Yershova, O. L., Zuieva, A. B., Kruchek, V. A., Maiboroda, L. A., Radkevych, O. P., & Subina, O. O. (2023). Blended learning of future skilled workers during wartime and postwar period: methodical guide. *Institute of Vocational Education of the NAES of Ukraine*, vol. 2023, 186 p. <https://doi.org/10.32835/978-617-95325-8-0/2023>
9. Kukharenko, V. M., & Bondarenko, V. V. (Eds.). (2022). Emergency distance learning in Ukraine. Kharkiv: KP City Printing House, 409 p. URL: [https://duan.edu.ua/images/News/UA/Departments/Management/2020/monograph\\_ekstr\\_dyst\\_navch.pdf](https://duan.edu.ua/images/News/UA/Departments/Management/2020/monograph_ekstr_dyst_navch.pdf)
10. Bilous, I. I., Krychivska, O. V., & Demianiuk, A. V. (2022). Distance education under crisis conditions. *Perspectives and Innovations of Science*, 8(13), 99–109. [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2022-8\(13\)-99-108](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2022-8(13)-99-108)
11. Novytska, L. I. (2025). Blended learning in higher education during wartime. *Academic Visions*, 40, 52–61. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/1712>
12. Pizintsali, L. V., Shumylo, O. M., & Aleksandrovska, N. I. (2022). Conducting laboratory classes under distance conditions. *Academic notes. Series: Pedagogical Sciences*, 204, 298–306. <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2022-1-204-298-306>
13. Kapustyan, V. O., Mazhara, G. A., & Fartushny, I. D. (2022). Modeling the economy [Textbook]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50013>
14. Maly, I. Y., Radionova, Yu. I., Kutsenko, T. F., Fedirko, N. V., & others (Comps.), (2017). *Macroeconomics: Basic electronic text of lectures*. Kyiv National Economic University, 200 p. URL: [http://feu.kneu.edu.ua/ua/depts4/mdu/disciplines\\_of\\_bachelor\\_level\\_mdu/macroeconomics/](http://feu.kneu.edu.ua/ua/depts4/mdu/disciplines_of_bachelor_level_mdu/macroeconomics/)
15. Kapustyan, O. V., & Sukretna, A. V. (2011). *Methods of nonlinear analysis in mathematical economics*. Taras Shevchenko National University of Kyiv, 213 p. URL: <https://diffeq.mechmat.knu.ua/download/NLAMinME.pdf>
16. Ponomarenko, O. I., Perestyuk, M. O., & Buryim, V. M. (2004). *Modern economic analysis. Part 1: Microeconomics*. Higher School Publishing House, 262 p. [https://mechmat.knu.ua/wp-content/uploads/2018/03/mikro\\_eko.pdf](https://mechmat.knu.ua/wp-content/uploads/2018/03/mikro_eko.pdf)