

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗІ КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЄЮ РОЗРАХУНКІВ У ТАБЛИЧНОМУ ПРОЦЕСОРІ

Мета роботи полягає у розробці універсального шаблону в табличному процесорі для пошуку оптимального розмірного налаштування металорізального верстата для мінімізації кількості виробничого браку у партії деталей.

Методи дослідження. Вибірка зі ста розмірів навання вибраних деталей із партії отримана емпірично шляхом проведення технічних вимірювань. Обчислення оптимального зміщення верстата виконано аналітичним способом зі застосуванням функцій та цифрових інструментів табличного процесору із метою комп'ютеризації та автоматизації розрахунків. Використані елементи математичної теорії оптимізації для складання цільової функції і формул для розрахунку оптимального зміщення.

Наукова новизна полягає у пошуку, визначенні, тестуванні та налагодженні роботи функцій та цифрових засобів візуалізації розрахунку табличного процесора з метою розробки універсальної таблиці для автоматизованого розрахунку оптимального розмірного зміщення металорізального обладнання, кількості виправного та невиправного виробничого браку і витрат на його усунення.

Практична значимість. В основі інженерної діяльності лежить процес оптимізації, як основний інструмент створення нових і вдосконалення вже розроблених технічних систем. Проблема полягає у відсутності комплексного підходу до вирішення оптимізаційних задач і демонстрації прикладів застосування теоретичного матеріалу у виробничому процесі. Висока практична значимість створеного шаблону полягає у значному скороченні часу на усунення виправного браку за рахунок його скорочення, зменшенні виробничих витрат, високому ступеню автоматизації розрахунків, відсутності необхідності придбання спеціалізованого програмного забезпечення та найму висококваліфікованого персоналу.

Формалізація та структуризація такого підходу до вирішення оптимізаційних завдань дозволить використовувати створені алгоритми для широкого спектра різних галузей виробництва, що посприє зміцненню економіки держави.

Результати. Отримана таблиця, яка після заповнення вибірки, граничних розмірів деталі за кресленням і витрат на 1% виправного і невиправного браку автоматично розраховує величину оптимального зміщення центру угруповання вибірки від центру поля допуску, кількість виробничого браку і вартість на його усунення.

Ключові слова. Оптимізація, виробничий брак, налаштування верстата, витрати, автоматизація розрахунків, прибутковість виробництва, машинобудування, технологічний процес.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-63-68

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Основною метою кожного ремонтного або виробничого підприємства є отримання максимального прибутку з одночасною мінімізацією витрат на виготовлення продукції, що в свою чергу дозволить підвищити конкурентоспроможність за рахунок підвищення якості готової продукції, своєчасного оновлення металорізального обладнання та верстатного оснащення, ріжучого та вимірювального інструменту, підвищення кваліфікації працівників і покращення умов праці, впровадження інноваційних технологій у виробничий процес.

Ключова проблема полягає у відсутності комплексного формалізованого підходу до пошуку оптимальних технічних рішень для підвищення прибутковості підприємства в умовах невизначеності виробничого процесу. Розв'язок вищезазначеної проблеми можливий за рахунок застосування математичної теорії оптимізації. Формалізація та структуризація такого підходу дозволить використовувати створені алгоритми для широкого спектра різних галузей виробництва, що посприє зміцненню економіки держави.

Також важливо знайти способи максимальної комп'ютеризації процесу розрахунків за рахунок використання інформаційних технологій. Це дозволить виключити людський фактор з окремих ланок розробки і реалізації технологічного процесу (ТП), збільшити потужність і прибутковість виробництва. Отже, наступна проблема полягає у пошуку загально доступного програмного забезпечення (ПЗ) для реалізації запропонованого у даній роботі підходу.

Процес оптимізації лежить в основі всієї інженерної діяльності, оскільки існує необхідність проектування нових інноваційних технічних систем (ТС) і одночасного покращення якості вже існуючих.

Одним з найбільш доцільних способів зниження витрат є зменшення виробничого браку. Але розрахувати заздалегідь, який відсоток бракованих деталей очікується, неможливо через невизначеність ТС. Цей показник є випадковим і залежить від різних факторів, деякі з яких не піддаються прогнозуванню (людський фактор, коливання температури, пружні віджимання елементів системи ВПД, інші випадкові похибки). Тому інженерам-технологам приходится приймати конкретні технічні рішення в умовах невизначеності, що вимагає створення структурованого підходу до вирішення поставлених завдань.

Аналіз досліджень і публікацій. Дана праця є продовженням роботи [1] над реалізацією практичного застосування створеного шаблону для розрахунку статистики емпіричної вибірки із ста розмірів навання вибраних деталей із партії.

В роботі [2] проведено оптимізацію витрат за рахунок пошуку раціональної стратегії керування обмеженими виробничими ресурсами на прикладі ТП виготовлення відцентрових насосів. Запропоновано два методи лінійного програмування – матричний та графічний. Для комп'ютеризації розрахунків використано спеціальне інженерне математичне ПЗ MathCAD.

Дослідження з пошуку шляхів оптимізації технічних систем у інженерних галузях проводяться за багатьма напрямками. У роботах [3, 4] комплексно аналізуються ланцюги поставки з оцінкою всього життєвого циклу виробів. У якості технічної системи розглядається підприємство загалом, а не окремі його складові.

Розглядається скорочення кількості використовуваних ресурсів за рахунок оптимізації топології виробів [5, 6], технології виготовлення матеріалів [7], технологічного процесу механічної обробки деталей [8]. Широко досліджуються можливості застосування імітаційного моделювання [9] та штучного інтелекту [10].

Загальною проблемою є те, що в наявній технічній літературі задачі оптимізації технічних систем носять спеціальний характер. Майже відсутні сучасні літературні джерела, які викладають теорію та практику оптимізації на системній основі та показують область доцільного використання різних підходів вирішення поставлених оптимізаційних завдань.

Постановка задачі. Є певним чином налаштований верстат, який оброблює певну поверхню деталі. Відомо тип оброблюваної поверхні, розмір із допуском по кресленню. Дано вибірку зі ста розмірів L_i знятих із випадкових деталей партії, собівартість доопрацювання 1% деталей із виправним браком ϕ_1 , собівартість 1% деталей невивиправно бракованих деталей ϕ_2 . Необхідно оптимізувати витрати на брак за рахунок переналаштування верстата, знайти величину ϵ , на яку зміщується середнє значення вибірки від середини інтервалу допуску.

Викладення матеріалу та результати. Проектування технічних систем – багатоетапний та багаторівневий процес, що вимагає обробки великої кількості даних. Систематична розробка технічних рішень можлива за рахунок використання математичної теорії оптимізації.

У широкому розумінні теорія оптимізації являє собою сукупність математичних методів, спрямованих на пошук найкращих (оптимальних) результатів з множини можливих варіантів. В першу чергу необхідно визначитись з видом та складовими елементами технічної системи.

Технічна система – це сукупність елементів та взаємозв'язків між ними, які створюють цілісну структуру об'єкту. У якості технічної системи в даній роботі розглядається технологічний процес виготовлення партії деталей, як основна частина виробничого процесу. Основні складові елементи технічної системи зображено на рис. 1.



Рис. 1. Складові технічної системи

Всі технологічні операції характеризуються техніко-економічними показниками, екологічністю, енергетичними витратами. Скорочення виробничих витрат можливо за рахунок ретельного аналізу кожної складової технічної системи з метою пошуку оптимальних технічних рішень. Деякі складові можна змінювати в певному діапазоні через наявні обмеження за тех-

нічними вимогами до виготовлюваної деталі (точність розмірів та якість поверхневого шару, механічні характеристики матеріалу, конфігурація, умови роботи тощо), наявними фінансовими, матеріальними та часовими ресурсами, рівнем технічної підготовки виробництва.

Наступним кроком необхідно скласти цільову функцію. Особливостями складання цільової функції для задачі пошуку оптимуму в умовах невизначеності у порівнянні зі складанням цільової функції для задачі із повністю визначеними даними є те, що у реальних умовах заздалегідь не завжди можна визначити значення кількісних показників, часто вони є випадковими. Тому цільова функція складається з використанням теорії ймовірності та методів математичної статистики, такими як математичне очікування, дисперсія, середньоквадратичне відхилення, закони розподілу випадкових величин тощо.

В загальному випадку вірогідність отримання браку обчислюється за формулою (1)

$$P = \frac{m}{n}, \quad (1)$$

де m – кількість бракованих деталей, n – загальна кількість отриманих деталей в партії.

Сформулюємо задачу у вигляді цільової функції. Нехай необхідно знайти таку величину зміщення групування розмірів від середини поля допуску, при якій технологічна собівартість операції буде мінімальна (2)

$$C = \varphi_1 p_1 + \varphi_2 p_2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $\varphi_1 p_1$ – вартість виправлення і ймовірність виправного браку відповідно, $\varphi_2 p_2$ – витрати і ймовірність невивправного браку відповідно.

Ймовірність отримання браку P визначається як площа заштрихованої фігури, обмеженої кривою нормального розподілу та прямими, що визначають межі допуску розміру (рис. 2).

Загальна формула для знаходження ймовірності браку (3)

$$P_i = \Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t_i^2}{2}} dt_i, \quad (3)$$

де t – нормований параметр розподілу (коефіцієнт ризику).

Коефіцієнт ризику виправного і невивправного браку для зовнішніх поверхонь визначається за формулами (4, 5) відповідно

$$t_1 = \frac{0,5T + \varepsilon}{\sigma}, \quad (4)$$

$$t_2 = \frac{0,5T - \varepsilon}{\sigma}, \quad (5)$$

де ε – зміщення центра угруповання вибірки від середини інтервалу допуску, T – допуск розміру за кресленням.

Тоді цільова функція приймає наступний вид

$$C = \Phi\left(\frac{0,5T + \varepsilon}{\sigma}\right) \varphi_1 + \Phi\left(\frac{0,5T - \varepsilon}{\sigma}\right) \varphi_2,$$

де $0 \leq \varepsilon \leq \frac{T}{2}$.

Визначимо похідну цільової функції, яку необхідно прирівняти до нуля

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \frac{d\Phi\left(\frac{0,5T + \varepsilon}{\sigma}\right)}{d\varepsilon} \varphi_1 + \frac{d\Phi\left(\frac{0,5T - \varepsilon}{\sigma}\right)}{d\varepsilon} \varphi_2 = 0.$$

Так як

$$\frac{d\Phi(t)}{d\varepsilon} = \frac{d\Phi(t)}{dt} \frac{dt}{d\varepsilon},$$

то отримуємо

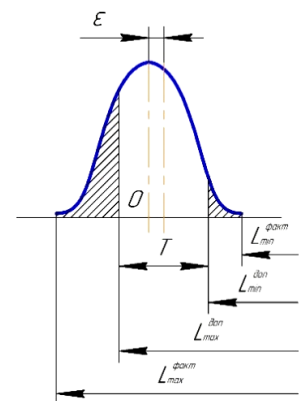


Рис. 2. Крива нормального розподілу Гауса при несиметричному розташуванні поля допуску

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left(\exp\left(\frac{(0,5T + \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right) \varphi_1 - \exp\left(\frac{(0,5T - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right) \varphi_2 \right) = 0,$$

$$\ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{(0,5T + \varepsilon)^2 - (0,5T - \varepsilon)^2}{2\sigma^2},$$

$$\ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{2\varepsilon T}{2\sigma^2}.$$

Отже, оптимальне зміщення для зовнішніх та внутрішніх поверхонь розраховується за формулами (6, 7) відповідно

$$\varepsilon_{\text{опт.зовн.}} = \frac{\sigma^2}{T} \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{опт.внутр.}} = \frac{\sigma^2}{T} \ln \frac{\varphi_1}{\varphi_2}, \quad (7)$$

Розробимо шаблон документа у табличному редакторі для комп'ютеризації розрахунків (рис. 3, 4).

Фактичне зміщення $\varepsilon = 0,88$ мкм відрізняється від оптимального $\varepsilon_{\text{опт}} = -1,54$ мкм і загальні витрати на брак складають 820,2 грн. На розраховану величину необхідно налаштувати верстат, після чого повторно обробити партію деталей зі 100 шт. з вимірюванням розміру кожної.

Зовнішній діаметр деталі по кресленню		
Вибірка	Статистичні дані вибірки	Вимоги до деталі по кресленню
11.996	Мінімум вибірки	Мінімальний розмір
11.996	11.996	11.995
11.996	Максимум вибірки	Максимальний розмір
11.996	12.006	12.006
11.997	Розмах вибірки	Допуск
11.997	0,01	0,011
11.997	Кількість елементів вибірки	
11.997	100	
11.997	Середнє арифметичне	Середній розмір
11.998	12.00138	12.00050
11.998	Відхилення σ	Зміщення ε , мкм
11.998	0,003	0.88000
11.998	Сер.арифм.-3 σ	Собівартість 1% виправлення деталей
11.998	11,993	20
11.998	Ліворуч значення вибірки вкладаються у -3 σ	Собівартість 1% невиправних деталей
11.998	Сер.арифм.+3 σ	170
11.999	12.010	
11.999	Праворуч значення вибірки вкладаються у +3 σ	Оптимальне зміщення ε , мкм
11.999		-1,504
11.999	Кількість інтервалів	
11.999	9	
11.999	Ширина інтервалів	
11.999	0,002	

а

A	B	C
1 Зовнішній діаметр деталі по кресленню		
2	Вибірка	Статистичні дані вибірки
3	11.996	Мінімум вибірки
4	11.996	=MIN(A3:A102)
5	11.996	Максимум вибірки
6	11.996	=MAX(A3:A102)
7	11.997	Розмах вибірки
8	11.997	=B6-B4
9	11.997	Кількість елементів вибірки
10	11.997	=COUNT(A3:A102)
11	11.997	Середнє арифметичне
12	11.998	=AVERAGE(A3:A102)
13	11.998	Відхилення σ
14	11.998	=STDEV(A3:A102)
15	11.998	Сер.арифм.-3 σ
16	11.998	=B12-B14*3
17	11.998	Ліворуч значення вибірки вкладаються у -3 σ
18	11.998	=IF(B4>B16,"вкладаються у -3 σ ","")
19	11.998	Сер.арифм.+3 σ
20	11.999	=B12+B14*3
21	11.999	Праворуч значення вибірки вкладаються у +3 σ
22	11.999	=IF(B6<B20,"вкладаються у +3 σ ","")
23	11.999	Кількість інтервалів
24	11.999	9
25	11.999	Ширина інтервалів
26	11.999	=(B20-B16)/B24

б

Рис. 3. Фрагмент шаблону з результатом розрахунку (а) і з формулами (б) для розрахунку оптимального зміщення

Імовірність розміру у допуску
0,941
виправного браку
0,011
невиправного браку
0,047
Витрати на невиправний, грн
798,5
Витрати на виправний, грн
21,8
820,2

а

L	
1	
2	
3	Імовірність розміру у допуску
4	=NORMDIST(SC\$6;SBS12;SBS14;1)-NORMDIST(SC\$4;SBS12;SBS14;1)
5	виправного браку
6	=NORMDIST(SC\$4;SBS12;SBS14;1)
7	невиправного браку
8	=NORMDIST(SBS20;SBS12;SBS14;1)-NORMDIST(SC\$6;SBS12;SBS14;1)
9	Витрати на невиправний, грн
10	=L7*100*C20
11	Витрати на виправний, грн
12	=L5*C17*100
	=L9+L11

б

Рис. 4. Фрагмент шаблону з результатом розрахунку (а) і з формулами (б) для розрахунку виробничого браку

Результати розрахунку виробничих витрат при оптимальному зміщенні центру групування наведено на рис. 5, зміна виду кривої нормального розподілу – на рис. 6.

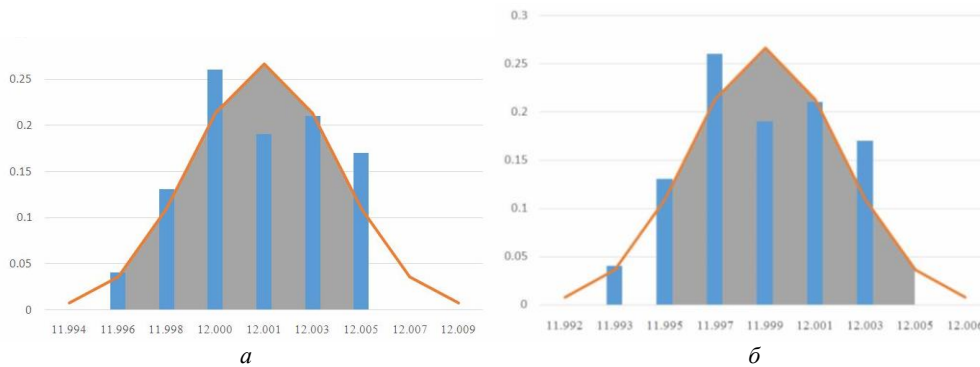
Вибірка	Статистичні дані вибірки	Вимоги до деталей по кресленню
11.994	Мінімум вибірки	Мінімальний розмір
11.994	11,994	11,995
11.994	Максимум вибірки	Максимальний розмір
11.994	12,004	12,006
11.995	Розмах вибірки	Допуск
11.995	0,01	0,011
11.995	Кількість елементів вибірки	
11.995	100	
11.995	Середнє арифметичне	Середній розмір
11.996	11,99900	12,00050
11.996	Відхилення σ	Зміщення ϵ , мкм
11.996	0,003	-1,50445
11.996	Сер.арифм.-3 σ	Собівартість 1% виправлення деталей
11.996	11,991	20
11.996	Ліворуч значення вибірки вкладаються у -3 σ	Собівартість 1% невинправних деталей
11.996	Сер.арифм.+3 σ	170
11.997	12,007	Оптимальне зміщення ϵ , мкм
11.997	Праворуч значення вибірки вкладаються у +3 σ	-1,504
11.997	Кількість інтервалів	
11.997	9	
11.997	Ширини інтервалів	
11.997	0,002	

а

Імовірність розміру у допуску	
	0,919
виправного браку	0,075
невинправного браку	0,005
Витрати на невинправний, грн	77,1
Витрати на виправний, грн	150,8
	227,9

б

Рис. 5. Результат розрахунку оптимального зміщення (а) і витрат (б) на виробничий брак після розмірного налаштування верстата



а

б

Рис. 6. Порівняння кривих нормального розподілу неоптимізованої (а) та оптимізованої (б) технічної системи

Висновки та напрямок подальших досліджень. Завдяки розробці універсального шаблону у табличному процесорі для розрахунку оптимального зміщення та виробничого браку вдалось скоротити витрати з 820 грн до 228 грн, тобто у 3,6 разів. Знайдене технічне рішення не потребує значних часових і матеріальних затрат, високої кваліфікації працівників, є майже повністю автоматизованим (вимагає тільки введення вибірки, максимального та мінімального граничного розміру, витрат на брак), простим в користуванні та сумісним з багатьма пристроями.

У подальшій роботі планується продовжити пошук оптимальних технічних рішень, що дозволять підвищити ефективність машинобудівної галузі України.

Список літератури

1. Кравцова Д.Ю., Зюган У.І. Статистична обробка інженерних вимірювань зі комп'ютеризацією розрахунків у табличному процесорі. Гірничий вісник. 2023. № 111. С. 22–26. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/5162>
2. Цивінда Н.І., Зюган У.І., Зуєв І. О. Підвищення надійності роботи обладнання оптимізацією витрат ремонтних ресурсів / Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції, 26 - 27 травня 2022 р. м. Чернігів, Том 1, с.159-162
3. Garcia D. J., You F. Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities. Computers & Chemical Engineering. 2015. Vol. 81. P. 153–170. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.03.015> (date of access: 25.03.2024).
4. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review / M. Eskandarpour et al. Omega. 2015. Vol. 54. P. 11–32. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>
5. Do B., Zhang R. Multi-fidelity Bayesian optimization in engineering design. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.13050>
6. Upare P., Kalatkar A., Shelke R. Review on study of design optimization for additive manufacturing of various mechanical/machine components. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1259, no. 1. P. 012039. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1259/1/012039>
7. Invited review: Machine learning for materials developments in metals additive manufacturing / N. S. Johnson et al. Additive Manufacturing. 2020. Vol. 36. P. 101641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101641>

8. Progress Toward Modeling and Optimization of Sustainable Machining Processes / **I. S. Jawahir** et al. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2020. Vol. 142, no. 11. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4047926>

9. Simulation optimization: a review of algorithms and applications / **S. Amaran** et al. Annals of Operations Research. 2015. Vol. 240, no. 1. P. 351–380. URL: <https://doi.org/10.1007/s10479-015-2019-x>

10. Engineering Applications of Artificial Intelligence in Mechanical Design and Optimization / **J. Jenis** et al. Machines. 2023. Vol. 11, no. 6. P. 577. URL: <https://doi.org/10.3390/machines11060577>

Рукопис подано до редакції 28.03.24

УДК: 528.4:332.3

Ю. Б. РАДЗІНСЬКА, канд.техн.наук, доц., М. Л. БАГІН, здобувач,
В. В. ГОЙ, канд.ekon.наук, докторант, В. О. ФРОЛОВ, канд.техн.наук, асистент
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

МІСТОБУДІВНІ ЧИННИКИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ: СТАН ТА НАПРЯМИ ТРАНСФОРМАЦІЙ

Метою статті є виокремлення містобудівних чинників щодо забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання: проаналізувати стан та тенденції змін містобудівних чинників; охарактеризувати містобудівні чинники забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Отже, представлена тема щодо визначення аналізу стану та трансформаційних процесів забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів є актуальною і має своєчасний характер.

Методи дослідження. У роботі застосовані загальнонаукові і спеціальні методи: систематизації, наукового обґрунтування, системного аналізу, виокремлення містобудівних чинників, оцінки.

Наукова новизна. Удосконалено теоретико-методичні підходи щодо визначення інвестиційної привабливості земель регіонів шляхом виокремлення відповідних чинників, зокрема містобудівних. Дістали подальшого розвитку результати оцінки містобудівних чинників для забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Практична значимість полягає у розробці та застосуванні кількісної основи щодо прийняття рішень для забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів та визначенні містобудівних чинників, які впливають на формування регіональної політики в сфері земельних відносин. Практична цінність дослідження обумовлена сучасними надзвичайними умовами, які визначаються зниженням ефективності використання земель, розбалансування зв'язків у системі земельних відносин, негативним впливом чинників, проведенням військових дій, обумовлюють формування напрямів та виокремлення особливостей забезпечення інвестиційної привабливості земель. Важливого значення набуває виокремлення чинників, що впливають на забезпечення інвестиційної привабливості, зокрема, у контексті формування та використання містобудівних факторів.

У результаті дослідження виокремлені містобудівні чинники, що впливають на інвестиційну привабливість земель регіонів. Встановлено, що за останні роки відбувається зниження основних показників функціонування будівельної сфери, що негативно впливають на забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів. Слід вказати на такий чинник як забудовані землі, який характеризується тенденціями до зниження у більшості регіонів. Містобудівні чинники формують багаторівневу систему показників для розробки та реалізації кількісної основи методу до оцінки рівня забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Ключові слова. Використання земель, інвестиційна привабливість земель, регіони, містобудівні чинники.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-68-73

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Сучасні надзвичайні умови, які визначаються зниженням ефективності використання земель, розбалансування зв'язків у системі земельних відносин, негативним впливом чинників, проведенням військових дій, обумовлюють формування напрямів та виокремлення особливостей забезпечення інвестиційної привабливості земель. Крім того, на недостатньому рівні здійснюється формування та застосування закордонних інвестицій, залучення вітчизняних інвесторів, що призводить до регіонального розвитку. Крім того, важливого значення набуває виокремлення чинників, що впливають на забезпечення інвестиційної привабливості, зокрема, у контексті формування та використання містобудівних факторів.

Аналіз досліджень і публікацій. Вирішенням питань щодо забезпечення інвестиційної привабливості земель займають вчені [1–6]. У контексті визначення інвестиційної привабливо-