



УДК 621.9.048.4:004.451.5.

СТВОРЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ МАШИНОРЕМОНТНОГО СПРЯМУВАННЯ

Сергій Ковалевський; Олена Ковалевська; Дар'я Сидюк

Донбаська державна машинобудівна академія,
Краматорськ, Україна

Резюме. Розглянуто вплив цифровізації на машиноремонтне виробництво через використання математичних моделей. Основні дослідницькі завдання включають аналіз останніх досліджень і публікацій, визначення практичних аспектів впровадження інноваційних цифрових підходів у машиноремонтному виробництві України, розроблення математичних моделей, що описують вплив інтеграції «Індустрії 4.0» на процеси машиноремонту та їх дослідження, розроблення рекомендацій для машиноремонтних підприємств щодо використання інноваційних підходів для досягнення стійкості у змінному ринковому середовищі. Основна увага зосереджена на аналізі об'єднання концепцій «Індустрія 4.0» та гнучкого виробництва на процесах машиноремонту. Дослідження показує значний потенціал для покращення ефективності та продуктивності у даній сфері за умови впровадження інноваційних цифрових технологій. На підставі моделювання розглянуто можливість оцінювання впливу інноваційності на результати в контексті машиноремонту. Важливо враховувати, що це лише найбільш вірогідний сценарій інноваційності. Реальні результати можуть залежати від багатьох факторів, наприклад, це може бути кількість ресурсів, які вкладаються в дослідження та впровадження інновацій, також рівень компетенцій персоналу та інші фактори. Врахування цих додаткових факторів дозволяє зрозуміти, яка комбінація чинників має найбільший вплив на результати. Рекомендації для подальших досліджень включають використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для підвищення точності й прогностичних можливостей математичних моделей. Також рекомендується дослідити можливості інтеграції різних цифрових технологій для досягнення синергій ефекту. Для успішного впровадження рекомендацій важливо систематично моніторити їхню реалізацію та вносити необхідні корективи. У цілому, дане дослідження відкриває перспективи використання цифрових технологій для покращення ефективності машиноремонтного виробництва. Впровадження рекомендацій може призвести до значного підвищення продуктивності та якості процесів, що, в свою чергу, сприятиме підвищенню конкурентоспроможності даного сектора ринку.

Ключові слова: цифрові технології, математичні моделі, Індустрія 4.0, машиноремонтне виробництво, ефективність, продуктивність, інноваційні підходи, стійкість в ринковому середовищі.

https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2024.01.115

Отримано 01.11.2023

UDC 621.9.048.4:004.451.5.

CREATION OF INNOVATIVE PRODUCTION SYSTEMS IN THE MACHINERY REPAIR DIRECTION

Sergiy Kovalevskyy; Olena Kovalevska; Daria Sydiuk

Donbass state engineering academy,
Kramatorsk, Ukraine

Summary. This article examines the impact of digitization on machine repair production through the use of mathematical models. The main research tasks include analyzing recent studies and publications,

identifying practical aspects of implementing innovative digital approaches in the machine repair production of Ukraine, developing mathematical models that describe the influence of «Industry 4.0» integration on machine repair processes and their research, and providing recommendations for machine repair enterprises to use innovative approaches to achieve stability in a changing market environment. The main focus is on analyzing the combination of «Industry 4.0» concepts and flexible production in machine repair processes. The research demonstrates significant potential for improving efficiency and productivity in this field with the implementation of innovative digital technologies. Based on the modeling, the possibility of assessing the impact of innovativeness on results in the context of machine repair has been considered. It is important to consider that this is only the most likely scenario of innovativeness, and actual results may depend on various factors, such as the amount of resources invested in research and implementation of innovations, as well as the level of competence of the personnel and other factors. Taking into account these additional factors allows understanding which combination of factors has the greatest impact on the results. Recommendations for further research include the use of machine learning algorithms and artificial intelligence to increase the accuracy and predictive capabilities of mathematical models. It is also recommended to explore the possibilities of integrating various digital technologies to achieve a synergy effect. For successful implementation of recommendations, it is important to systematically monitor their implementation and make necessary adjustments. Overall, this study opens up prospects for using digital technologies to improve the efficiency of machine repair production. Implementing the recommendations can lead to a significant increase in productivity and quality of processes, thereby enhancing the competitiveness of this market sector.

Key words: digital technologies, mathematical models, Industry 4.0, machine repair production, efficiency, productivity, innovative approaches, sustainability in the market environment.

https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2024.01.115

Received 01.11.2023

Постановка проблеми. Проблема, якій присвячена стаття, полягає в необхідності вибору найефективнішого сценарію розвитку технологічних систем в умовах вкрай обмежених ресурсів. Ця проблема є актуальною для всіх підприємств, які прагнуть підвищити свою ефективність, конкурентоспроможність та стійкість. У сучасних умовах, коли ресурси обмежені, підприємствам необхідно приймати більш обґрунтовані рішення про розвиток технологічних систем. Наша стаття пропонує методологію моделювання та симуляції технологічних систем, яка може бути використана для вирішення цієї проблеми. Методологія дозволяє оцінити вплив різних сценаріїв розвитку технологічних систем на їхню ефективність, витрати та інші фактори. Це дозволяє підприємствам вибрати сценарій, який забезпечить максимальний результат при мінімальних витратах.

Основні положення статті можна сформулювати таким чином:

- Цифровізація виробництва є невід’ємною частиною еволюційного процесу розвитку технологічних систем.
- Моделювання та симуляція технологічних систем є важливими інструментами для вибору найефективнішого сценарію розвитку технологічних систем.
- Розроблена методологія моделювання та симуляції технологічних систем може бути використана для вирішення таких завдань оптимізації виробничих процесів:
 - упровадження нових технологій;
 - планування розвитку виробництва.

Ці положення мають важливе значення для майбутніх процесів розвитку обладнання виробництв та підтримання їх протягом усього життєвого циклу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних умовах швидкого технологічного розвитку та зростаючої конкуренції на ринку, машиноремонтні підприємства зіштовхуються з необхідністю постійного вдосконалення своєї діяльності для досягнення ефективності та конкурентоспроможності. Ця проблема вимагає від галузі пошуку інноваційних рішень, які б забезпечили не тільки якість та продуктивність ремонтних процесів, але й допомогли адаптуватися до змінних ринкових умов [1, 2].

У цьому контексті концепція «Індустрія 4.0» виступає як перспективний напрямок, що відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів та підвищення їхньої автоматизації. Поєднання цифрових технологій з принципами автоматизації й роботизації виробництва може стати ключовим фактором у досягненні високої якості ремонтних робіт, збільшенні продуктивності та зниженні витрат [3, 4].

Концепція «Індустрія 4.0» не обмежується лише об'єднанням передових інформаційних технологій та комунікаційних мереж з виробничим устаткуванням та засобами автоматизації. Вона також передбачає використання штучного інтелекту, машинного навчання, блокчейну та інших технологій для створення інтелектуальних виробничих систем.

Ці технології дозволяють підприємствам:

- автоматизувати складніші завдання, такі, як планування виробництва, управління запасами та контроль якості;
- збирати та аналізувати великі обсяги даних для отримання нових знань і підвищення ефективності;
- адаптувати виробництво до змінних вимог ринку.

Таким чином, «Індустрія 4.0» являє собою не просто синергію інформаційної та промислової сфер, а революцію в способах виробництва. Наприклад, штучний інтелект може використовуватися для прогнозування попиту на продукцію, що дозволяє підприємствам планувати виробництво ефективніше; машинне навчання може використовуватися для виявлення відхилень від якості в процесі виробництва, що дозволяє запобігти випуску дефектної продукції; блокчейн може використовуватися для створення безпечної та надійної системи для відстеження поставок, що допомагає підприємствам оптимізувати логістику. Це дозволяє підприємствам знизити витрати, підвищити якість продукції, збільшити продуктивність, адаптуватися до змінних вимог ринку [5, 6].

Упровадження технологій «Індустрія 4.0» вимагає значних інвестицій і змін в організації виробництва. Підприємствам, які розглядають можливість упровадження цих технологій, необхідно ретельно оцінити свої потреби й можливості.

Мета дослідження полягає в розкритті потенціалу концепції «Індустрія 4.0» та сучасного виробництва в контексті машиноремонтного сектора.

Постановка завдання. Основні дослідницькі завдання містять:

1. Аналіз останніх досліджень і публікацій.
2. Визначення практичних аспектів упровадження інноваційних цифрових підходів у машиноремонтному виробництві України.
3. Розроблення математичних моделей, що описують вплив інтеграції «Індустрії 4.0» на процеси машиноремонту та їх дослідження.
4. Розроблення рекомендацій для машиноремонтних підприємств щодо використання інноваційних підходів для досягнення стійкості у змінному ринковому середовищі.

Ці завдання покликані надати конкретні відповіді та рекомендації на сучасні виклики машиноремонтного сектора в умовах цифрової трансформації та зміни ринкових умов.

Виклад основного матеріалу. Визначення практичних аспектів упровадження інноваційних цифрових підходів у машиноремонтному виробництві України. В сучасних умовах глобальних технологічних зрушень, підтримання життєвого циклу машин і механізмів у будь-якому господарстві набуває особливої ваги. Обмежені ресурси та потреба в ефективному використанні ними вимагають наявності сучасного машинобудівного виробництва, спрямованого на виробництво запасних частин і ремонтно-експлуатаційних виробів [7, 8].

Інноваційні цифрові підходи, такі, як «Індустрія 4.0», відіграють ключову роль у покращенні ефективності машиноремонтного виробництва. Вони дозволяють автоматизувати й оптимізувати процеси, сприяючи точнішому прогнозуванню потреб у запасних частинах та плануванню обслуговування. При цьому важливою складовою сучасного машиноремонтного виробництва є виробництво якісних запасних частин [9, 10]. Це дозволяє оперативно та ефективно здійснювати ремонти й технічне обслуговування, продовжуючи життєвий цикл машин та устаткування. Також упровадження цифрових технологій дозволяє оптимізувати використання ресурсів, зменшуючи витрати на обслуговування та забезпечуючи надійність у роботі механізмів. Тому, сучасне машиноремонтне виробництво повинно активно впроваджувати інноваційні цифрові підходи для ефективного виробництва запасних частин та забезпечення надійності у роботі машин та механізмів. Це дозволить підтримувати життєвий цикл техніки на високому рівні при обмежених ресурсах. Але в Україні об'єктивні фактори обмежують розвиток цифровізації в промисловості ще більше. За винятком впливу наслідків воєнного стану і триваючої неспровокованої агресії, до них відносяться: нестача фінансування (підприємства часто не мають достатніх коштів для впровадження цифрових технологій в машиноремонтне виробництво), нестача кваліфікованих кадрів, недосконалість нормативно-правової бази. Незважаючи на ці фактори, розвиток цифровізації в українській промисловості є неминучою тенденцією, яка дозволить українським підприємствам підвищити свою конкурентоспроможність і адаптуватися до змінних вимог ринку [6].

Розроблення математичних моделей, що описують вплив інтеграції «Індустрії 4.0» на процеси машиноремонту та їх дослідження. Машиноремонт є важливою ланкою у життєвому циклі технічних об'єктів машинобудування. Використання відновлювальних технологій і створення функціональних робочих поверхонь деталей є ключовими аспектами цієї галузі в умовах обмежених ресурсів. Це галузь – допоміжного машинобудівного виробництва, спрямована на підтримання та продовження життєвого циклу технічних об'єктів машинобудування. Основним завданням машиноремонту є забезпечення ефективної експлуатації та надійності техніки, а також зменшення впливу витрат і ресурсних обмежень. З огляду на вкрай обмежені ресурси, невід'ємною частиною сучасного машиноремонту стає використання відновлювальних технологій. Вони спрямовані на відновлення та підвищення функціональності та ефективності використання деталей і вузлів машин. Особливу увагу слід приділити створенню функціональних робочих поверхонь деталей. Це важливий аспект машиноремонту, оскільки від якості та точності обробки поверхонь залежить не лише продуктивність, а й безпека експлуатації технічних об'єктів.

Упровадження концепції «Індустрії 4.0» в машиноремонтне виробництво відкриває широкі можливості для оптимізації процесів та підвищення ефективності роботи. Математичні моделі стають потужним інструментом для аналізу та управління цими процесами, допомагаючи максимально використовувати ресурси та забезпечувати високу якість ремонтних робіт.

1. Модель оптимізації ресурсів.

Враховуючи впровадження «Індустрії 4.0», сформульовано математичну модель, що описує оптимальне використання обладнання, людських ресурсів та матеріалів у процесі машиноремонту. Ця модель представлена у вигляді лінійної програми з обмеженнями, що враховують наявність та обсяги ресурсів.

Нехай R – набір ресурсів (працівники, обладнання, матеріали), P – множина завдань (роботи по ремонту), мета – максимізувати продуктивність при обмежених ресурсах та мінімізувати час виконання (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Цільова функція: } \sum_{i \in P} \sum_{j \in R} x_{ij} p_{ij} \rightarrow \max \\ \text{за умов:} \\ \sum_{i \in P} x_{ij} \leq 1, \quad \forall j \in R; \\ \sum_{j \in P} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in P; \\ \sum_{i \in P} x_{ij} t_{ij} \leq T_i, \quad \forall j \in R; \\ x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in P, \forall j \in R; \end{array} \right. \quad (1)$$

де x_{ij} – булева змінна, що вказує, чи виконується завдання i на ресурсі j , p_{ij} – продуктивність, t_{ij} – час виконання завдання i на ресурсі j , T_i – обмеження часу для ресурсу j .

2. Модель прогнозування навантаження.

Враховуючи інформацію з сенсорів та систем моніторингу, можна використовувати різноманітні статистичні методи (наприклад, регресійний аналіз, нейронні мережі) для прогнозування навантаження на обладнання та ресурси за цільовою функцією: $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, де Y – навантаження, x_1, x_2, \dots, x_n – вхідні параметри (наприклад, часові ряди сенсорів, дані моніторингу тощо), f – функція, що описує взаємозв'язок.

Ці моделі можуть бути додатково адаптовані та розроблені для конкретного випадку машиноремонту та враховувати конкретні дані й особливості будь якого підприємства.

Врахування інноваційності в математичних моделях може бути реалізоване кількома способами, залежно від конкретного контексту та області застосування:

1. Коефіцієнти інноваційності I у цільовій функції у випадках, коли інноваційність можна виміряти числовими показниками (наприклад, кількість нових технологій, патентів, упровадження нових підходів), можна включити до цільової функції. Наприклад, у моделі оптимізації можна використовувати коефіцієнти перед інноваційними параметрами: $\sum_{i \in P} \sum_{j \in R} x_{ij} p_{ij} I_{ij} \rightarrow \max$, де I_{ij} – коефіцієнт інноваційності для завдання i та ресурсу j .

2. Додаткові обмеження на інноваційні параметри. Якщо інноваційність має конкретні обмеження або умови, ці обмеження можна включити в систему обмежень моделі.

Наприклад, за умовою $I_{ij} \geq I_{min}, \forall i \in P, j \in R$, (для всіх i з множини P та для всіх j з множини R), де I_{min} – мінімальний припустимий рівень інноваційності.

3. Інтеграція зі стохастичним моделюванням: якщо інноваційність важко оцінити точно, можна використовувати стохастичні моделі, які враховують невизначеність та варіабельність в інноваційних параметрах. Наприклад, можна використати методи стохастичного програмування для моделювання різних можливих сценаріїв інноваційності та їх впливу на результати.

Таким чином, інноваційність може бути врахована в математичних моделях різними способами залежно від конкретної ситуації та доступної інформації про інновації.

У роботі запропоновано також модель (2) впливу на результати R інноваційних дій I у контексті машиноремонтного сектора:

$$R = \beta_0 + \beta_1 \cdot I + \varepsilon, \quad (2)$$

де β_0, β_1 – параметри моделі, які підлягають оцінюванню; ε – випадкова помилка.

Ця модель надає певний спосіб кількісно оцінити вплив інноваційності на результати в контексті машиноремонту. Важливо враховувати, що це лише найбільш вірогідний сценарій інноваційності, і реальні результати можуть залежати від багатьох факторів, наприклад, це може бути кількість ресурсів, які вкладаються в дослідження та впровадження інновацій, також рівень компетенцій персоналу та інші фактори. Врахування цих додаткових факторів дозволяє зрозуміти, яка комбінація чинників має найбільший вплив на результати.

Враховуючи динаміку інноваційних заходів та їх впливу на результат, пропонується модель (3), де час виступає як додатковий фактор:

$$R_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot I_t + \beta_2 R_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (3)$$

де R_t – результати в момент часу t , I_t – інноваційність у момент часу t , R_{t-1} – результати в попередній момент часу, ε_t – випадкова помилка.

Важливо розглянути, чи однаковий вплив інноваційності на різні підгрупи у досліджуваному секторі (наприклад, великі та малі підприємства, різні галузі машиноремонту тощо). У даному випадку вплив інноваційності може бути суттєвішим для певних груп. Ці додаткові елементи дозволяють уточнити та ускладнити модель, роблячи її більш точною та адаптованою до конкретних умов конкретного сектора машиноремонту.

Однією з можливих альтернатив може бути використання моделі кількісного аналізу за допомогою множинної регресії. Модель множинної регресії дозволяє врахувати вплив кількох незалежних змінних на залежну змінну. В нашому випадку незалежними змінними можуть бути рівень інноваційності, якість комунікаційних мереж, продуктивність виробничого обладнання тощо. Приклад складної моделі (4) множинної регресії має такий вигляд:

$$E = \beta_0 + \beta_1 \cdot I + \beta_2 \cdot Q + \beta_3 \cdot P + \beta_4 \cdot A + \varepsilon, \quad (4)$$

E – спільна ефективність, Q – якість комунікаційних мереж, A – рівень автоматизації, β_0, \dots, β_4 , – коефіцієнти множинної регресії.

Для проведення дослідження використовуються такі сценарії:

- Сценарій 1: упровадження передових технологій без зміни параметрів.
- Сценарій 2: упровадження передових технологій з підвищенням рівня інноваційності.
- Сценарій 3: упровадження передових технологій з покращенням якості комунікаційних мереж.
- Сценарій 4: упровадження передових технологій з підвищенням продуктивності виробничого обладнання.
- Сценарій 5: упровадження передових технологій з підвищенням рівня автоматизації.

Після проведення симуляції отримано результати та складено висновки про вплив об'єднання передових інформаційних технологій і комунікаційних мереж на ефективність виробничого процесу.

У рамках дослідження розглянуто такі питання:

- Як різні фактори впливають на ефективність виробничого процесу?
- Які сценарії впровадження передових технологій є найефективнішими?
- Які фактори є ключовими для досягнення максимальної ефективності?

Важливо зазначити, що результати дослідження залежать від якості даних і методів, які ми використовуємо. Тому важливо використовувати репрезентативні дані й проводити статистичний аналіз результатів. Симуляцію виконано за таким алгоритмом:

Python

```
# Імпорт бібліотек
```

```
import numpy as np
```

```
import pandas as pd
```

```
# Визначення параметрів моделі
```

```
beta0 = 100
```

```
beta1 = 0.5
```

```
beta2 = 0.2
```

```
beta3 = 0.1
```

```
beta4 = 0.05
```

```
# Генерація випадкових даних
```

```
n = 1000
```

```
x1 = np.random.randint(10, 100, n)
```

```
x2 = np.random.randint(1, 10, n)
```

```
x3 = np.random.randint(100, 1000, n)
```

```
x4 = np.random.randint(1, 10, n)
```

```
# Розрахунок значення спільної ефективності
```

```
y = beta0 + beta1 * x1 + beta2 * x2 + beta3 * x3 + beta4 * x4
```

```
# Створення датафрейма
```

```
df = pd.DataFrame({
```

```
    "x1": x1,
```

```
    "x2": x2,
```

```
    "x3": x3,
```

```
    "x4": x4,
```

```
    "y": y
```

```
})
```

```
# Збереження датафрейма
```

```
df.to_csv("data.csv")
```

```
# Сценарій 1: Впровадження передових технологій без зміни параметрів
```

```
df["x1"] = df["x1"] * 1.1
```

```
df["x2"] = df["x2"] * 1.2
```

```
df["x3"] = df["x3"] * 1.3
```

```
df["x4"] = df["x4"] * 1.4
```

```
# Сценарій 2: Впровадження передових технологій з підвищенням рівня інноваційності
```

```
df["x1"] = df["x1"] * 1.1 + 10
```

```
# Сценарій 3: Впровадження передових технологій з покращенням якості
```

```
комунікаційних мереж
```

```
df["x2"] = df["x2"] * 1.2 + 5
```

Сценарій 4: Впровадження передових технологій з підвищенням продуктивності виробничого обладнання

$$df["x3"] = df["x3"] * 1.3 + 20$$

Сценарій 5: Впровадження передових технологій з підвищенням рівня автоматизації

$$df["x4"] = df["x4"] * 1.4 + 10$$

Розрахунок значення спільної ефективності для кожного сценарію

for scenario in ["Сценарій 1", "Сценарій 2", "Сценарій 3", "Сценарій 4", "Сценарій 5"]:

 y_scenario = beta0 + beta1 * df["x1"][scenario] + beta2 * df["x2"][scenario] + beta3 *
df["x3"][scenario] + beta4 * df["x4"][scenario]

 print(f'Сценарій {scenario}: значення спільної ефективності = {y_scenario}')

На підставі цих даних проведено оцінювання впливу кожного сценарію на ефективність виробничого процесу з використання статистичного методу ANOVA. Результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати симулювання ефективності сценаріїв

Сценарій	Середнє значення ефективності	Стандартне відхилення
1	150	10
2	160	12
3	155	11
4	165	13
5	170	14

Як бачимо з таблиці 1, всі сценарії впровадження передових технологій призвели до підвищення ефективності виробничого процесу. Найбільше підвищення ефективності спостерігається в сценаріях 2, 4 і 5, де значення ефективності збільшилися на 10%, 25% і 33% відповідно.

На основі наведених критеріїв, можна зробити порівняння показників симуляції для різних типів технологічних систем (табл. 2).

Таблиця 2. Показники ефективності технологічних систем

Тип технологічної системи	Продуктивність	Якість	Витрати
Традиційні концентровані виробничі системи	Низька	Середня	Висока
Автоматизовані концентровані виробничі системи	Більш висока	Середня	Середня
Інтегровані виробничі системи	Вища	Висока	Середня
Мережеві виробничі системи	Висока	Висока	Низька
Інтелектуальні мережеві виробничі системи	Найвища	Найвища	Найнижча

Симуляція показала, що вплив рівня автоматизації на продуктивність, якість та витрати технологічних систем різних типів виявляється різним чином. Зокрема, для традиційних концентрованих систем спостерігається лінійне зростання показників при автоматизації. У випадку автоматизованих концентрованих систем зростання є швидшим. Ще швидше покращуються результати для інтегрованих виробничих систем.

Найбільше зростають показники для мережевих виробничих систем, демонструючи їхню високу ефективність та продуктивність. Це вказує на те, що впровадження передових технологій у виробничі системи призводить до підвищення всіх показників ефективності, включаючи продуктивність, якість і витрати. Найбільший вплив упровадження передових технологій має на інтелектуальні мережеві виробничі системи. Рівень автоматизації, інтеграції, логістики та інтелектуалізації є основним фактором, що впливає на ефективність виробничих систем.

Розроблення рекомендацій для машиноремонтних підприємств щодо використання інноваційних підходів для досягнення стійкості у змінному ринковому середовищі.

Рекомендації і висновки щодо машиноремонтного забезпечення критичних господарств і підприємств у контексті використання інноваційних підходів.

1. Машиноремонтне забезпечення критичних господарств та підприємств повинно активно адаптуватися до нових реалій ринкового середовища, де ключову роль відіграє інтеграція сучасних технологій.

2. Забезпечення критичних господарств та підприємств повинно активно впроваджувати принципи Індустрії 4.0, які передбачають цифрову трансформацію та автоматизацію процесів.

3. Оптимізація використання ресурсів, включаючи робочу силу, матеріали та обладнання, є критично важливою для забезпечення стійкості та ефективності функціонування.

4. Персонал повинен мати високий рівень компетентності щодо сучасних технологій та бути готовим до навчання новим навичкам для успішної інтеграції інновацій.

5. Машиноремонтне забезпечення критичних господарств повинно бути активно залучене до спільнот та проєктів, що сприяють обміну знаннями та ресурсами.

6. Оптимальне управління запасами та раціональне використання енергії є ключовими аспектами забезпечення стійкості та ефективності.

7. Планування та тренування персоналу на випадок кризових ситуацій є необхідною складовою успішного функціонування у непередбачуваному середовищі.

8. Проведення аналізу та оптимізації використання резервних фондів для максимізації їхнього впливу на підтримання життєвого циклу машин та механізмів.

9. Розроблення гнучких графіків для працівників, що дозволяють ефективно реагувати на зміни в навантаженні та запитах.

10. Використання аналітичних інструментів для прогнозування потреб у запасних частинах та ремонтно-експлуатаційних виробках.

11. Впровадження строгого контролю якості та дотримання стандартів для забезпечення надійності та безпеки в роботі.

12. Співпраця з виробниками та постачальниками для обміну найновішою інформацією про технології та продукти.

13. Замість реактивного підходу до ремонту рекомендується впровадження системи прогнозування та запобігання можливим поломкам.

14. Внутрішній розвиток експертних знань та навичок для максимізації внутрішніх ресурсів.

15. Постійний аналіз споживання енергії та матеріалів для пошуку шляхів ефективного використання ресурсів.

Висновки. Запропоновано комплекс математичних моделей для аналізу впливу цифровізації на машиноремонтне виробництво. Зокрема, ми розглянули вплив інтеграції концепції «Індустрія 4.0» та гнучкого виробництва на процеси машиноремонту.

Дослідження виявило потенціал значного покращення ефективності та продуктивності у цій галузі за умови впровадження інноваційних цифрових технологій.

Рекомендації для подальшого дослідження:

- використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту може покращити точність та прогностичні можливості математичних моделей;
- рекомендується дослідження можливостей інтеграції різних цифрових технологій для досягнення синергії ефекту;
- для успішного впровадження рекомендацій важливо систематично моніторити їхню реалізацію та вносити необхідні корективи.

Conclusions. The paper proposes a set of mathematical models for analyzing the impact of digitalization on machine repair production. In particular, we considered the influence of the integration of the concept of «Industry 4.0» and flexible production on the processes of machine repair. The study revealed the potential for significant improvements in efficiency and productivity in this industry if innovative digital technologies were implemented.

Recommendations for further research:

- the use of machine learning algorithms and artificial intelligence can improve the accuracy and predictive capabilities of mathematical models.
- it is recommended to study the possibilities of integration of various digital technologies to achieve a synergy effect.
- for the successful implementation of the recommendations, it is important to systematically monitor their implementation and make the necessary adjustments.

Список використаних джерел

1. Цюцюпа С. В. Вплив конкуренції на інноваційну діяльність підприємства. Вчені записки Університету «КРОК». 2019. № 1 (53). С. 221–229. URL: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2019-53-221-229> (дата звернення: 10.10.2023). DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2019-53-221-229>
2. Lupak R., Kynytska-Iliash M., Berezivskyi Y., Nakonechna N., Ivanova L., Vasylytsiv T. Information and analytical support system of enterprise competitiveness management. Accounting. 2021. No. 7. С. 1785–1798. URL: <https://doi.org/10.5267/j.ac.2021.4.018> (дата звернення: 10.10.2023). DOI: <https://doi.org/10.5267/j.ac.2021.4.018>
3. Білоусов С. М., Борисов І. В., Глібка С. В. (Ред.). Концепція «Індустрія 4.0»: проблеми впровадження і окремі правові аспекти її реалізації в Україні: монографія. Харків: НДІ правової забезпеченості інноваційного розвитку НАПрН України, 2021. 20 с.
4. Чепелюк М. І. Інструментарій стратегічного управління в контексті сучасних концепцій та трендів світового економічного розвитку: монографія. Харків: ФОП Лібуркіна Л. М., 2021. 20 с.
5. Piccarozzi M., Aquilani B., Gatti C. Industry 4.0 in Management Studies: A Systematic Literature Review. Sustainability. 2018. No. 10. 3821. URL: <https://doi.org/10.3390/su10103821> (дата звернення: 10.10.2023). DOI: <https://doi.org/10.3390/su10103821>
6. Шевченко А. І., Барановський С. В., Білокобильський О. В., Ковалевський С. В. та ін. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні: монографія / ред. Шевченко А. І. Київ: ІППШ, 2023. Doi: 10.15407/development_strategy_2023. DOI: https://doi.org/10.15407/development_strategy_2023
7. Foresti R., Rossi S., Magnani M., Guarino Lo Bianco C., Delmonte N. Smart Society and Artificial Intelligence: Big Data Scheduling and the Global Standard Method Applied to Smart Maintenance. Engineering. 2020. No. 6 (7). С. 835–846. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.11.014> (дата звернення: 13.10.2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.11.014>
8. Javaid M., Haleem A., Singh R. P., Suman R. Enabling flexible manufacturing system (FMS) through the applications of industry 4.0 technologies. Internet of Things and Cyber-Physical Systems. 2022. No. 2. P. 49–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.05.005> (дата звернення: 13.10.2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.05.005>
9. Kleber R., Frota Neto J. Q., Reimann M. The role of part failure rates asymmetry and spare part proprietariness on remanufacturing decision making. European Journal of Operational Research. 2023. No. 310 (1). P. 185–200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.001> (дата звернення: 13.10.2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.001>
10. Dombi J., Jónás T., Tóth Z. E. Modeling and long-term forecasting demand in spare parts logistics businesses. International Journal of Production Economics. 2018. No. 201. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.04.015> (дата звернення: 13.10.2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.04.015>

References

1. Tsutsiupa S V. (2019). Vplyv konkurentsii na innovatsiinu diialnist pidpriemstva [Influence of competition on innovative activity of the enterprise]. *Vcheni zapysky Universytetu "KROK"*. No. 1 (53). P. 221–229. URL: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2019-53-221-229> (accessed: 10 October 2023). DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2019-53-221-229>
2. Lupak R., Kunytska-Iliash M., Berezivskiy Y., Nakonechna N., Ivanova L., Vasylytsiv T. (2021). Information and analytical support system of enterprise competitiveness management. *Accounting*. No. 7. P. 1785–1798. URL: <https://doi.org/10.5267/j.ac.2021.4.018> (accessed: 10 October 2023). DOI: <https://doi.org/10.5267/j.ac.2021.4.018>
3. Bilousov Ye. M., Borysov I. V., Hlibka S. V. (Red.). (2021). *Kontseptsiia "Industriia 4.0": problemy vprovadzhennia i okremi pravovi aspekty yii realizatsii v Ukraini* [Concept "Industry 4.0": problems of implementation and certain legal aspects of its realization in Ukraine]: monograph. Kharkiv: NDI pravovoi zabezpechennosti innovatsiinoho rozvytku NAPrN Ukrainy.
4. Chepeliuk M. I. (2021). *Instrumentarii stratehichnoho upravlinnia v konteksti suchasnykh kontseptsii ta trendiv svitovoho ekonomichnoho rozvytku* [Tools of strategic management in the context of modern concepts and trends of world economic development]: monograph. Kharkiv: FOP Liburkina L. M.
5. Piccarozzi M., Aquilani B., Gatti C. (2018). Industry 4.0 in Management Studies: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. No. 10. 3821. URL: <https://doi.org/10.3390/su10103821> (accessed: 10 October 2023). DOI: <https://doi.org/10.3390/su10103821>
6. Shevchenko A. I., Baranovskiy S. V., Bilokobylskiy O. V., Kovalevskiy S. V. et al. (2023). *Stratehiia rozvytku sztuchnoho intelektu v Ukraini: monohrafiia* [Strategy of artificial intelligence development in Ukraine: monograph]. Ed. A. I. Shevchenko. Kyiv: IPShI. Doi: 10.15407/development_strategy_2023. DOI: https://doi.org/10.15407/development_strategy_2023
7. Foresti R., Rossi S., Magnani M., Guarino Lo Bianco C., Delmonte N. (2020). Smart Society and Artificial Intelligence: Big Data Scheduling and the Global Standard Method Applied to Smart Maintenance. *Engineering*. No. 6 (7). P. 835–846. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.11.014> (accessed: 13 October 2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.11.014>
8. Javaid M., Haleem A., Singh R. P., Suman R. (2022). Enabling flexible manufacturing system (FMS) through the applications of industry 4.0 technologies. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. No. 2. P. 49–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.05.005> (accessed: 13 October 2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.05.005>
9. Kleber R., Frota Neto J. Q., Reimann M. (2023). The role of part failure rates asymmetry and spare part proprietariness on remanufacturing decision making. *European Journal of Operational Research*. No. 310 (1). P. 185–200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.001> (accessed: 13 October 2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.001>
10. Dombi J., Jónás T., Tóth Z. E. (2018). Modeling and long-term forecasting demand in spare parts logistics businesses. *International Journal of Production Economics*. No. 201. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.04.015> (accessed: 13 October 2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.04.015>