

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОСТИЧНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОПАРКУ

Андрусенко С.І., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

Білецький В.О., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, volodymyrbiletsky56@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7235-6442

Бугайчук О.С., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, bug_os@ukr.net, orcid.org/0000-0001-8646-6263

Подписнов В.С., Національний транспортний університет, Київ, Україна, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

COST-EFFECTIVENESS OF REMOTE MONITORING AND PREDICTIVE FLEET MAINTENANCE

Andrusenko S.I., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

Biletskyi V.O., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, volodymyrbiletsky56@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7235-6442

Buhaichuk O.S., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, bug_os@ukr.net, orcid.org/0000-0001-8646-6263

Podpisnov V.S., National Transport University, Kyiv, Ukraine, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

Постановка проблеми.

Автомобільна промисловість переживає період швидкого розвитку, оскільки виробники транспортних засобів та оригінального обладнання для них (Original Equipment Manufacturer – **OEM**) активно працюють над створенням наступного покоління електричних, автономних та підключених транспортних засобів, а також засобів і програмного забезпечення для дистанційного діагностування і постійного моніторингу діагностичних параметрів у режимі реального часу 24 години на добу, 7 діб на тиждень через мережу Інтернет.

Разом із тим, незалежні виробники контрольно-діагностичного обладнання і телематичних пристроїв для автомобілів також розробляють обладнання і програми, що дозволяють, хоча і обмежено, реалізовувати функції дистанційного моніторингу діагностичних параметрів. Це відкриває можливість доступу до значних обсягів діагностичної інформації та застосування методів технічної прогностики в галузі автомобільного транспорту.

Унаслідок цього багато виробників та компаній, що працюють у галузі технічного обслуговування (ТО) і ремонту транспортних засобів, розпочинають інвестувати у технології прогнозування, які значно просунулися протягом останніх десятиліть, переважно в аерокосмічній галузі.

Для менеджерів автопарків, які мають та експлуатують велику кількість транспортних засобів, технології прогнозування та раннього виявлення несправностей відкривають можливості застосування стратегій прогностичного обслуговування, що дозволяє досягти значної економії коштів порівняно з коригувальними або превентивними стратегіями технічного обслуговування.

Проте розробка технологій, необхідних для прогностичного обслуговування, може бути дорогою справою, що вимагає великої кількості компонентів, місяців збору даних і, можливо, років інженерних зусиль. У зв'язку з цим критично важливо розуміти очікувану віддачу від інвестицій (Return On Investment – **ROI**) у розробку такого проєкту.

Аналіз відомих нам публікацій [1-10] у галузі розроблення і застосування прогностичних стратегій ТО показав, що існує велика кількість робіт, присвячених розгляду ефективності окремих видів діяльності різних сфер господарства. Але моделей, достатньо адаптованих до оцінки економічної ефективності впровадження дистанційного моніторингу та прогностичного технічного обслуговування автомобільних транспортних засобів, недостатньо для оцінки діяльності в конкретних умовах, і вони не охоплюють усіх суттєвих сторін такої діяльності.

Метою досліджень є аналіз складових діяльності дистанційного моніторингу і прогностичного обслуговування автотранспортних засобів та визначення підходів до максимізації ефективності такої стратегії ТО для оцінки перспективності стартапів у цій галузі й напрямів розвитку бізнесу, які дозволять спрогнозувати майбутні фінансові результати діяльності компанії, такі як виручка, прибуток, грошовий потік, що необхідно для розробки бізнес-планів, бюджетів і стратегічного планування.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Економічну ефективність систем прогностичного технічного обслуговування (Predictive Maintenance – **PdM**) аналізують за допомогою поєднання математичних моделей, фінансових метрик та прикладних досліджень. З наукової точки зору використовують стохастичні імітаційні моделі (наприклад, **Марковські ланцюги** та **Моделювання методом Монте-Карло**), які враховують розподіли часу до відмови і ймовірності несправностей. Так, Гарнер та ін. описують загальну схему, в якій моделюються процеси деградації, алгоритми діагностування і вартість дій, а моделювання методами Монте-Карло дає розподіл витрат на ремонт за різних стратегій обслуговування [11, 12].

Прикладні підходи включають **cost-benefit analysis** та оцінку **ROI/TCO**.

ROI (Return on Investment) зазвичай обчислюють як відношення чистого прибутку (витрат) до вкладених інвестицій.

TCO (Total Cost of Ownership) – всі витрати на володіння.

Наприклад, **ROI** можна формулювати як

$$ROI = \frac{\text{Чистий прибуток (вигода) від інвестиції}}{\text{Сума інвестицій}}, \quad (1)$$

де чистий прибуток – це різниця між вигодами і витратами.

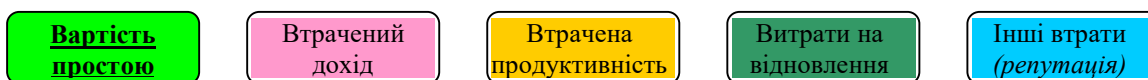
HanAra зазначає, що в контексті **PdM** часто спрощено розраховують **ROI** за формулою, запропонованою в [12].

Водночас метод **TCO** (Total Cost of Ownership) підсумовує всі витрати на володіння автотранспортом – починаючи з купівлі й амортизації, закінчуючи експлуатаційними витратами (паливо, обслуговування, страхівка тощо) [13]. Наприклад, підприємство «А» оцінює річні витрати на утримання пікапу приблизно в \$10 000 [13]. У моделюванні порівнюють поточні витрати автопарку з довгостроковими витратами після впровадження **PdM**, включаючи оцінку чистої приведеної вартості або внутрішньої норми рентабельності.

Вигоди від впровадження PdM.

Прогностичне технічне обслуговування (**PdM**) приносить низку економічних переваг, що включають: **скорочення простоїв, зниження аварійних ремонтів, оптимізацію витрат на ТО, зменшення запасів запчастин та підвищення безпеки.**

- **Зменшення простоїв.** Несподівані поломки зупиняють автотранспорт, призводячи до великих фінансових втрат. Вартість простою можна оцінити як суму втрат доходу та інших витрат (наприклад, виплату штрафів, затримки доставок, витрати на допомогу тощо). За прикладною формулою:



де кожний доданок охоплює відповідні збитки [14].

Дослідження показують, що простої можуть сягати величезних сум. Наприклад, у транспортній галузі один день простою вантажівки часто оцінюють у сотні доларів США [13], а в масштабі промислового підприємства втрати доходу від простою можуть сягати сотень тисяч доларів за годину. Використання **PdM** дозволяє планувати ТО безпосередньо перед можливим виходом з ладу, тим самим суттєво скорочуючи непланові зупинки і витрати на них [13]. Так, за даними Sensorfy, впровадження **PdM** у середньому дає 35-45 % зниження непланового простою техніки [15].

- **Уникнення аварійних ремонтів.** Регулярний контроль стану двигуна, гальм та інших систем дає змогу виявити дрібні проблеми до їхнього переростання у серйозні відмови. Завдяки цьому знижуються витрати на дорогі аварійні ремонти із застосуванням додаткових ресурсів і термінових поставок запчастин. Згідно з дослідженнями Aberdeen, **PdM** здатен зменшити кількість аварійних поломок до ~ 70 % порівняно з традиційним обслуговуванням [16]. Іншими словами, 70 %

несподіваних поломок можна попередити завдяки своєчасним прогнозам. Дохідні розрахунки таких втрат враховують різницю між витратами на аварійний ремонт і плановий (з урахуванням переоплати за терміновість).

- **Оптимізація витрат на ТО.** PdM дозволяє виконувати роботи тільки за потреби – коли система справді вимагає втручання. Це уникає непотрібних регулярних операцій, характерних для календарного обслуговування. Згідно з аналітикою, при переході на PdM витрати на планове обслуговування машин скорочуються приблизно на 25-30 % [15]. Менеджмент підприємств може порівняти теперішні витрати (без PdM) з очікуваними витратами після впровадження PdM, використовуючи формалізовані методики (розрахунок чистої теперішньої вартості, CBA, ROI).

- **Зниження запасів запчастин.** За традиційної моделі для надійності автопарку часто підтримують великий склад аварійних запчастин. Впровадження PdM дозволяє відкладати заміну компонентів до реальної потреби, що зменшує потребу в об'ємних складах. Як наслідок, скорочується капітал, зв'язаний у запасі, та супутні витрати на зберігання. Наприклад, Sensorfy підкреслює, що PdM «позбавляє необхідності накопичувати великий запас запчастин», звільняючи фінансові ресурси і оптимізуючи запаси [15].

- **Підвищення безпеки.** Постійний моніторинг і кореляція даних дозволяють передбачати потенційно небезпечні відмови (наприклад, вихід з ладу гальм чи підвіски). Це сприяє зниженню аварійності і, як наслідок, економії від непрямих втрат. Оглядові джерела відзначають, що поліпшення технічного обслуговування збільшує безпеку: підвищення дисципліни водіїв і підтримка техніки в належному стані зменшують ризик дорожньо-транспортних пригод [13]. Наприклад, Questar звертає увагу, що «кращі звички водіїв призводять до меншого зносу і кращого показника безпеки автопарку, що зрештою знижує витрати на страхування» [13]. Отже, вкладення в PdM частково відшкодовуються за рахунок зниження страхових внесків та уникнення штрафів і репутаційних втрат.

Порівняння з традиційними моделями ТО.

У традиційних моделях технічного обслуговування (календарного або на основі пробігу) роботи виконуються за заздалегідь встановленими інтервалами, незалежно від фактичного стану автомобіля [17]. Це дає прогнозованість графіків, але часто призводить до двох проблем:

- 1) **зайві роботи** – машини обслуговуються навіть без явної потреби;
- 2) **несподівані відмови** – деталі можуть вийти з ладу поза запланованими вікнами обслуговування.

Натомість **PdM** ґрунтується на безперервному моніторингу параметрів (температура, вібрації, електричні сигнали тощо) і дозволяє планувати інтервенцію **лише за фактичною потребою** [17].

Коротко: стратегія **превентивного ТО** (preventive) вимагає менших початкових витрат на технології, але часто призводить до необґрунтовано частих профілактичних процедур і все ще залишає імовірність поломок у проміжках графіка [17].

Натомість **PdM** вимагає інвестицій у сенсори, зв'язок і аналітику на початку, але дозволяє уникнути зайвого обслуговування та значно знизити загальні витрати у перспективі [17].

Наприклад, вартісний аналіз показує: **відмови обладнання** при традиційному ТО зберігаються на рівні 100 %, а за PdM – знижуються на 70-75 % [15]. **Незаплановані простої** – за даними Deloitte, превентивне ТО може знизити простої до 45 %, а впровадження PdM дає додаткове скорочення простоїв на 35-45 % [16]. Загальні **витрати на обслуговування** зменшуються на ~ 25-30 % [15] з переходом на прогностичну модель.

Нижче наводимо порівняльну таблицю основних параметрів.

Як видно з таблиці, інвестиції у прогностичні технології компенсуються зменшенням аварійності, простоїв і непотрібних витрат. Більш детальні моделі враховують також амортизацію обладнання, інвестиції у навчання персоналу та супутні витрати.

Далі наводимо приклади практичних кейсів:

- **United Road (важкі перевезення):** після пілотного впровадження рішення Uptake Radar компанія досягла ~ 4-кратного ROI. Кожне передбачуване технічне рішення одразу економило в середньому по \$400 на вантажівці завдяки уникненню простою та ремонтів [18]. Отже, щорічна вигода на одну машину оцінюється приблизно в \$3 387 [18].

- **Місто Лонг-Біч (муніципальний автопарк):** використання AI-платформи Pitstop Connect для прогностичного обслуговування більш ніж 600 автомобілів дозволило місту скоротити річні витрати на ТО та ремонти приблизно на \$809 500 [19]. Це результат поліпшеної діагностики та розумнішого планування обслуговування, що мінімізувало непланові зупинки та оптимізувало ресурси сервісних бригад.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця
Table 1 – Comparison table

Параметр	Календарне/превентивне ТО	Прогностичне ТО (PdM)
Планування ТО	Жорстко за часом чи пробігом [17]	Зіставлено зі станом систем (датчики ІОТ) [17]
Непланові поломки	Частіші (вища ймовірність несподіваних відмов)	Рідші (– 70-75 % поломок) [15]
Незаплановані простої	Вищі (відмови поза графіками)	Нижчі (– 35-45 % часу простою) [15]
Витрати на ТО	Вищі (багато профілактичних робіт)	Нижчі (оптимізація робіт – 25-30 %) [17]
Запас запчастин	Більший (страховий запас)	Менший (точково необхідні деталі) [15]
Рівень безпеки	Нижчий (вищий ризик аварій)	Вищий (менше відмов та аварій) [13]

- **Глобальна логістична компанія:** за даними Deloitte, впровадження PdM-систем у мережі сортувальних центрів дало вигоду понад **\$100 млн на рік**. Це було досягнуто за рахунок поліпшення аналітики сенсорних даних і оптимізації інтервалів ТО на сотнях об'єктів, що розблокувало близько + 4 % продуктивності мережі [20].

- **Інші приклади.** За різними оцінками, промислові підприємства, що використовують PdM, показують типовий ROI у $\approx 10 \times$ від початкових інвестицій [15]. Також відомі кейси встановлення прогностичного моніторингу в автобусних парках (наприклад, Go-Ahead Ireland), де організації декларують мету «нуль поломок» і нараховують суттєве скорочення аварійних ремонтів (точні цифри часто не розкриваються).

Висновки.

Отже, сучасні аналітичні й прикладні підходи дозволяють кількісно оцінити вигоди від **PdM** й порівняти їх із витратами на впровадження систем дистанційного моніторингу [12]. Наприклад, чисельні моделі показують, що завдяки **PdM** сумарні витрати на технічне обслуговування можуть знизитись на десятки відсотків, а окупність інвестицій досягається за декілька місяців/років залежно від масштабу автопарку.

Перспективи подальшого дослідження.

1. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення фінансової моделі, розробку методики оцінки ризиків та розрахунок різних варіантів проєкту для розуміння впливу суттєвих параметрів на економічну ефективність та ефективність діяльності підприємства.

2. Наступним напрямом для досліджень є вдосконалення методів та засобів збирання, накопичення, оброблення і аналізування масивів даних із діагностичними та супутніми параметрами, створення математичних моделей, що описують їх змінювання у різноманітних умовах експлуатації транспортних засобів у функції часу та застосування їх для прогнозування і оцінювання можливостей виникнення несправностей та потреби у виконанні конкретних видів робіт ТО, а саме моделей:

- змінювання діагностичних параметрів для інтерполяції та екстраполяції;
- «цифрових двійників» (Digital Twins), тобто створення віртуальної копії, у даному випадку, автомобіля для прогнозування його технічного стану, аналізу поведінки, потреби в обслуговування та ремонті;
- «цифрових портретів несправностей» для можливості застосування їх у технологіях автоматичного чи автоматизованого розпізнавання несправностей, що вже сталися, чи для прогнозування можливості їхнього виникнення спеціалізованим програмним забезпеченням;
- розрахунків кількісних «показників здоров'я» для деталей, вузлів, агрегатів та систем транспортних засобів в реальному часі для того, щоб своєчасно планувати профілактичне обслуговування і зменшувати витрати на непередбачувані ремонти та втрати від незапланованих простоїв.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Волков В.П., Матейчик В.П., Грицук П.Б., Грицук І.В. Моніторинг технічного стану автомобіля в життєвому циклі: Підручник / за заг. ред. проф. В.П. Волкова. – Харків: ХНАДУ, 2017. – 300 с.

2. Волков В.П., Онищук В.П., Волкова Т.В., Левчук М.А. Інтеграція інформаційно-програмного комплексу в віртуальне підприємство автомобільного транспорту [Електронний ресурс]. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: Науковий журнал*. 2025. № 1 (24). С. 157-169. Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1720>.
3. Волков В.П., Гризук І.В., Онищук В.П., Волкова Т.В., Стельмашук В.В., Збицький Д.Д. Удосконалення інформаційно-програмного комплексу для контролю технічного стану автомобілів в підприємстві автомобільного транспорту [Електронний ресурс]. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: Науковий журнал*. 2024. № 1 (22). С. 116-129. Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1352>.
4. Вовчак О., Верес З. Метод побудови та дизайн системи відстеження телеметричних даних на базі ІОТ для моніторингу роботи транспортного засобу [Електронний ресурс]. *MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES: International Scientific-technical journal, «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»: Міжнародний науково-технічний журнал*. 2023. № 4. С. 27-33. Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-3>.
5. Гончарук І.П., Головань А.І. Інноваційна система машинного навчання для моніторингу судового обладнання в реальному часі [Електронний ресурс]. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2025. Випуск 2 (43). С. 104-116. Режим доступу: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.09>.
6. Федосова І.В., Осадчий М.С. Система прогнозування стану автомобіля на основі статистичних даних діагностичного роз'єму OBD-II [Електронний ресурс]. *Наука та виробництво*. 2020. №23. С. 346-353. Режим доступу: <https://doi.org/10.31498/2522-9990232020241201>.
7. Головіна О.В., Холодний Ю.Ф., Строков О.П., Жовтобрюх В.О. Дослідження впливу якості діагностики і ремонту електронних систем на подальшу технічну експлуатацію автомобіля [Електронний ресурс]. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Том 1. № 1 (92). С. 57-62. Режим доступу: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.7>.
8. Іваськів Р., Доскочинський Д. Інноваційні методи діагностики гальмівних систем у транспортних засобах [Електронний ресурс]. *MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES: International Scientific-technical journal, «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»: Міжнародний науково-технічний журнал*. 2024. № 4. С. 137-142. Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-17>.
9. Савін Ю.Х., Соколенко О.В. Контроль технічного стану транспортних засобів шляхом аналізу інформації з бортової діагностики в процесі експлуатації [Електронний ресурс]. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: Науковий журнал*. 2025. № 1 (24). С. 367-374. Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1743>.
10. Білецький В.О., Іванушко О.М., Лобода А.В., Бугайчук О.С., Ловга Р.М. Огляд інформаційних та комунікаційних технологій і систем моніторингу на транспорті та аналіз їхніх можливостей для формування і впровадження інноваційних технологій технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів [Електронний ресурс]. *Автошляховик України: Науково-виробничий журнал*. 2023. № 1. С. 8-13. Режим доступу: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-1-273-8-16>.
11. Graeme Garner, Paola Santanna, and Hossein Sadjadi. Modeling the Business Value of a Predictive Maintenance System using Monte Carlo Simulation. General Motors Company, Canadian Technical Center, Markham, Ontario, L3R 4H8, Canada, General Motors Global Technical Center, Warren, Michigan, 48093, USA. *ANNUAL CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY*, Vol. 13. № 1. 2021. Режим доступу: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phmconf/article/view/2985>. DOI: <https://doi.org/10.36001/phmconf.2021.v13i1.2985>.
12. PdM ROI: Evaluating the Value, Context, Role. Режим доступу: <https://www.hanarasoft.com/pdm-roi/>.
13. How Predictive Vehicle Health Management helps reduce Total Cost of Ownership - Questar. Режим доступу: <https://questarauto.com/how-predictive-vehicle-health-management-helps-reduce-tco/>.
14. How to calculate the cost of downtime | ConnectWise. Режим доступу: <https://www.connectwise.com/blog/how-to-calculate-the-cost-of-downtime>.

15. How to calculate your predictive maintenance ROI? | Sensorfy. Режим доступу: <https://www.sensorfy.ai/blog/how-to-calculate-the-roi-of-a-predictive-maintenance-strategy/>.
16. Preventive & Predictive Maintenance: Reducing Downtime & Costs. Режим доступу: <https://www.team-group.com/insights/25-Feb-PredictiveMaintenance.pdf>.
17. Predictive maintenance vs. preventive maintenance | TXI. Режим доступу: <https://txidigital.com/insights/predictive-maintenance-vs-preventive-maintenance>.
18. United road capitalizes on predictive maintenance with 4x ROI. Режим доступу: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uptake-production/images/Resources/Uptake_Case-Studies-United-Road.pdf.
19. City of Long Beach Improves Operational Efficiency with Innovative AI-Driven Fleet Maintenance - Pitstop. Режим доступу: <https://pitstopconnect.com/project/city-of-long-beach-improves-operational-efficiency-with-innovative-ai-driven-fleet-maintenance>.
20. Predictive maintenance Deloitte's approach. Predictive Maintenance Solutions | Deloitte US. Режим доступу: <https://www.deloitte.com/us/en/services/consulting/services/predictive-maintenance-and-the-smart-factory.html>.

REFERENCES

1. Volkov, V.P., Mateichyk, V.P., Grytsuk, P.B., & Grytsuk, I.V. (2017). *Monitorynh tehnicnoho stanu avtomobiliv v zhyttievomu tsykli: Pidruchnyk; za red. prof. V.P. Volkova* [Monitoring the technical condition of a car in its life cycle: Textbook]. Prof. V.P. Volkov (Ed.). Kharkiv: KHNADU. 300 p. [in Ukrainian].
2. Volkov, V.P., Onyshchuk, V.P., Volkova, T.V., & Levchuk, M.A. (2025). *Intehratsiia informatsiyno-programnoho kompleksu v virtualne pidpruiemstvo avtomobilnoho transportu* [Integration of the information and software system into the virtual enterprise of automotive transport]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: Naukovyi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: Scientific journal*, 1 (24), 157-169. Retrieved from: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1720> [in Ukrainian].
3. Volkov, V.P., Grytsuk, I.V., Onyshchuk, V.P., Volkova, T.V., Stelmashchuk, V.V., & Zbytskyi, D.D. (2024). *Udoskonalennia informatsiyno-programnoho kompleksu dlia kontroliu tekhnichnoho stanu avtomobiliv v pidpruiemstvi avtomobilnoho transportu* [Enhancement of information and software systems for vehicle technical condition monitoring in automotive transport enterprises]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: Naukovyi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: Scientific journal*, 1 (22), 116-129. Retrieved from: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1352> [in Ukrainian].
4. Vovchak, O., & Veres, Z. (2023). *Metod pobudovy ta dyzayn systemy vidstezhennia telemetrynykh danykh na bazi IOT dlia monitorynhu roboty transportnoho zasobu* [Design method for an IOT-based telemetry tracking system for vehicle operation monitoring]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh procesakh: Mizhnarodnyi nauko-tekhnichnyi zhurnal – MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES: International Scientific-technical journal*, 4, 27-33. Retrieved from: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-3> [in Ukrainian].
5. Goncharuk, I.P., & Golovan, A.I. (2025). *Innovatsiyna systema mashynnoho navchannia dlia monitorynhu sudnovoho obladnannia v realnomu chasi* [Innovative machine learning system for real-time monitoring of shipboard equipment]. *Vodnyi transport: Zbirnyk naukovykh prats - Water transport: Collection of scientific papers*, 2 (43), 104-116. Retrieved from: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.09> [in Ukrainian].
6. Fedosova, I.V., & Osadchy, M.S. (2020). *Systema prohnozuvannia stanu avtomobilia na osnovi statystychnykh danykh diahnostychnoho roziemu OBD-II* [Vehicle condition prediction system based on statistical data from the OBD-II diagnostic port]. *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, 23, 346-353. Retrieved from: <https://doi.org/10.31498/2522-9990232020241201> [in Ukrainian].
7. Golovina, O.V., Kholodnyi, Y.F., Stokov, O.P., & Zhovtobriukh V.O. (2025). *Doslidzhennia vplyvu yakosti diahnostyky i remontu elektronnykh system na podalshu tekhnichnu ekspluatatsiiu avtomobilia* [Impact of electronic system diagnostics and repair quality on the subsequent technical operation of vehicles]. *Visnyk Khersonskogo natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of the Kherson*

- National Technical University, 1, 1 (92), 57-62. Retrieved from: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.7> [in Ukrainian].
8. Ivaskiv, R., & Doskochynskyi, D. (2024). *Innovatsiyni metody diagnistyky galmivnykh system u transportnykh zasobakh* [Innovative methods for vehicle brake systems diagnostics]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh procesakh: Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal – MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES: International Scientific-technical journal*, 4, 137-142. Retrieved from: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-17> [in Ukrainian].
 9. Savin, Yu.Kh., & Sokolenko, O.V. (2025). *Kontrol tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv shliakhom analizu informatsiyi z bortovoyi diahnostryky v protsesi ekspluatatsiyi* [Control of the technical condition of vehicles through analysis of on-board diagnostic data during operation]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: Naukovi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: Scientific journal*, 1 (24), 367-374. Retrieved from: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1743> [in Ukrainian].
 10. Biletskyi, V.O., Ivanushko, O.M., Loboda, A.V., Buhaichuk, O.S., & Lovha, R.M. (2023). *Ohliad informatsiynykh ta komunikatsiynykh tekhnolohiy i system monitorynhu na transporti ta analiz yikhnikh mozhlyvostey dlia formuvannia i vprovadzhennia innovatsiynykh tekhnolohiy tekhnichnoho obslukhovuvannia i remontu transportnykh zasobiv* [Overview of information and communication technologies and vehicle monitoring systems and analysis of their possibilities for the formation and implementation of innovative technologies for maintenance and repair of vehicles]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy: Naukovo-vyrobnychy zhurnal – Road Transporter and Road Constructor of Ukraine: Scientific and Production Journal*, 1, 8-13. Retrieved from: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-1-273-8-16> [in Ukrainian].
 11. Graeme Garner, Paola Santanna, & Hossein Sadjadi. (2021). Modeling the Business Value of a Predictive Maintenance System using Monte Carlo Simulation. General Motors Company, Canadian Technical Center, Markham, Ontario, L3R 4H8, Canada, General Motors Global Technical Center, Warren, Michigan, 48093, USA. ANNUAL CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY, 13, 1. Retrieved from: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phmconf/article/view/2985>. DOI: <https://doi.org/10.36001/phmconf.2021.v13i1.2985> [in English].
 12. PdM ROI: Evaluating the Value, Context, Role. Retrieved from: <https://www.hanarasoft.com/pdm-roi/> [in English].
 13. How Predictive Vehicle Health Management helps reduce Total Cost of Ownership - Questar. Retrieved from: <https://questarauto.com/how-predictive-vehicle-health-management-helps-reduce-tco/> [in English].
 14. How to calculate the cost of downtime | ConnectWise. Retrieved from: <https://www.connectwise.com/blog/how-to-calculate-the-cost-of-downtime> [in English].
 15. How to calculate your predictive maintenance ROI? | Sensorfy. Retrieved from: <https://www.sensorfy.ai/blog/how-to-calculate-the-roi-of-a-predictive-maintenance-strategy/> [in English].
 16. Preventive & Predictive Maintenance: Reducing Downtime & Costs. Retrieved from: <https://www.team-group.com/insights/25-Feb-PredictiveMaintenance.pdf> [in English].
 17. Predictive maintenance vs. preventive maintenance | TXI. Retrieved from: <https://txidigital.com/insights/predictive-maintenance-vs-preventive-maintenance> [in English].
 18. United road capitalizes on predictive maintenance with 4x ROI. Retrieved from: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uptake-production/images/Resources/Uptake_Case-Studies-United-Road.pdf [in English].
 19. City of Long Beach Improves Operational Efficiency with Innovative AI-Driven Fleet Maintenance - Pitstop. Retrieved from: <https://pitstopconnect.com/project/city-of-long-beach-improves-operational-efficiency-with-innovative-ai-driven-fleet-maintenance/> [in English].
 20. Predictive maintenance Deloitte's approach . Predictive Maintenance Solutions | Deloitte US. Retrieved from: <https://www.deloitte.com/us/en/services/consulting/services/predictive-maintenance-and-the-smart-factory.html> [in English].

РЕФЕРАТ

Андрусенко С.І. Економічна ефективність дистанційного моніторингу та прогностичного технічного обслуговування автопарку / С.І. Андрусенко, В.О. Білецький, О.С. Бугайчук, В.С. Подпіснєв // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У статті розглянуто економічні передумови та потенційні переваги впровадження системи дистанційного моніторингу комерційного автотранспорту з погляду підвищення ефективності експлуатації та оптимізації витрат на технічне обслуговування. Проаналізовано сучасні підходи до обслуговування транспортних засобів, зокрема обмеження традиційних методів планово-попереджувального та регламентного обслуговування. Акцент зроблено на можливостях цифрових технологій моніторингу, які забезпечують оперативну діагностику, підтримку прийняття рішень і впровадження стратегій прогностичного технічного обслуговування, що дозволяє суттєво скоротити простій і витрати на ремонт.

Наведено порівняльний аналіз традиційних моделей обслуговування і підходів, заснованих на використанні телеметричних даних та аналітики. Запропоновано узагальнену модель аналізу витрат та вигод (cost-benefit analysis), що включає ключові показники ефективності, такі як рівень використання обладнання, інтервали між обслуговуванням та показник рентабельності інвестицій (ROI). Окремо розглянуто проблеми впровадження, зокрема пов'язані з початковими інвестиціями, інфраструктурним забезпеченням і підготовкою персоналу.

Зроблено висновок, що інтеграція систем дистанційного моніторингу сприяє не лише підвищенню технічної надійності та безпеки автопарку, а й покращенню загальних економічних показників діяльності транспортних підприємств. Запропонований методичний підхід може бути використаний як у малих, так і у великих автогосподарствах і слугувати основою для стратегічного планування та цифрової трансформації у сфері транспорту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ, ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ, ПРОГНОСТИЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ, РЕНТАБЕЛЬНІСТЬ ІНВЕСТИЦІЙ.

ABSTRACT

Andrusenko S.I., Biletskyi V.O., Buhaichuk O.S., Podpisnov V.S. Cost-effectiveness of Remote Monitoring and Predictive Fleet Maintenance. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article examines the economic rationale and potential advantages of introducing a remote monitoring system for commercial vehicles in the context of operational efficiency and maintenance cost optimization. The authors analyze current trends in vehicle maintenance, emphasizing the limitations of traditional preventive and scheduled maintenance approaches. The study highlights how digital monitoring technologies allow for real-time diagnostics, improved decision-making, and predictive maintenance strategies that significantly reduce downtime and repair expenses.

A comparative assessment is provided between conventional maintenance models and those based on digital telemetry and analytics. The authors present a generalized cost-benefit analysis model, outlining key performance indicators (KPIs) that include equipment utilization, maintenance intervals, and return on investment (ROI). Particular attention is paid to implementation challenges such as initial investment, infrastructure requirements, and personnel training.

The paper concludes that the integration of remote monitoring systems contributes not only to enhanced technical reliability and safety of fleet operations but also to the overall economic performance of transport enterprises. The proposed methodological approach can be applied in both small and large-scale fleet operations, serving as a basis for strategic planning and digital transformation in the transport sector.

KEYWORDS: ROAD TRANSPORT, REMOTE MONITORING, PREDICTIVE MAINTENANCE, OPERATIONAL EFFICIENCY, COST OPTIMIZATION, ROI.

АВТОРИ:

Андрусенко Сергій Іванович, кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, тел. +380634720587, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410А, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Білецький Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, Київ, Україна, e-mail: volodymyrbiletsky56@gmail.com, тел. +380984649945, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, <https://orcid.org/0000-0001-7235-6442>

Бугайчук Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: bug_os@ukr.net, тел. +380679955818, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, <https://orcid.org/0000-0001-8646-6263>.

Подпіснєв Владислав Сергійович, Національний транспортний університет, старший викладач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, тел. +380989623871, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

AUTHORS:

Andrusenko Serhii I., Ph.D. in Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, tel. +380634720587, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410A, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Biletskyi Volodymyr O., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: volodymyrbiletsky56@gmail.com, tel. +380984649945, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0001-7235-6442.

Buhaichuk Oleksandr S., Ph.D. in Technical Science, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: bug_os@ukr.net, tel. +380679955818, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0001-8646-6263.

Podpisnov Vladyslav S., National Transport University, Senior Lecturer of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, tel. +380989623871, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Клименко О.А., доктор технічних наук, доцент, Державне підприємство «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут», заступник директора з наукової роботи, Київ, Україна.

Сахно В.П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри автомобілів, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Klymenko O.A., Doctor of Technical Science, Associate Professor, State Enterprise «State Road Transport Research Institute», Deputy Director for Research, Kyiv, Ukraine.

Sakhno V.P., Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Department of Automobiles, Kyiv, Ukraine.

ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМІЗОВАНОГО БЛОГ-ДОДАТКУ

Безверхий О.І., доктор фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, o_bezver@ukr.net, orcid.org/0000-0002-0834-6335

Дедул О.С., Національний транспортний університет, Київ, Україна, sasha15200201@gmail.com, orcid.org/0009-0009-1722-2869

DESIGNING OPTIMIZED BLOG APPLICATION

Bezverkhii O.I., Doctor of physical and mathematical Science, National transport university, Kyiv, Ukraine, o_bezver@ukr.net, orcid.org/0000-0002-0834-6335

Dedul O.S., National Transport University, Kyiv, Ukraine, sasha15200201@gmail.com, orcid.org/0009-0009-1722-2869

Блог-додаток є веб-платформою, яка надає користувачам можливість читати, створювати та публікувати статті на різноманітні теми. Додаток будемо проектувати за принципом односторінкового додатка (SPA), що означає, що користувачам надається безперервний досвід взаємодії без перезавантаження сторінок. Це забезпечує високу швидкість роботи додатка та зменшує затримки під час переходу між сторінками.

Основна функціональність додатка включає публікацію статей, управління користувацьким контентом, а також соціальну взаємодію через коментарі та вподобання. Користувачі можуть реєструватися на платформі, створювати особисті профілі, писати статті, залишати коментарі та відповідати на них. Крім того, додаток надає можливість стежити за вподобаними авторами та отримувати сповіщення про нові публікації.

Інтерфейс додатка розроблений таким чином, щоб забезпечити інтуїтивно зрозумілу навігацію. У додатку є головна стрічка новин, де відображаються останні та найпопулярніші статті, а також категорії, за якими можна здійснювати фільтрацію контенту. Для зручності користувачів передбачено функцію пошуку статей за ключовими словами та автором. Для зменшення навантаження на сервер і покращення продуктивності додаток використовує технології кешування та оптимізації запитів, що дозволяє забезпечити плавний досвід роботи навіть при значній кількості контенту та великій кількості користувачів.

Основні функціональні вимоги

1. Управління статтями: можливість створення, редагування, видалення і перегляду статей. Користувачі повинні мати можливість легко створювати контент та керувати ним через зручний інтерфейс.

2. Коментарі: можливість користувачам залишати коментарі до статей, а також взаємодіяти з іншими користувачами через функціонал відповідей на коментарі.

3. Аутентифікація та авторизація: підтримка реєстрації нових користувачів, входу в систему, виходу, а також захист доступу до певних функцій додатка (наприклад, можливість створення або редагування статей тільки для авторизованих користувачів).

4. Пошук та фільтрація статей: можливість пошуку статей за ключовими словами, а також фільтрації статей за різними критеріями, такими як дата публікації, популярність або автор.

5. Підтримка багатомовності: додаток має підтримувати кілька мов (наприклад, українську та англійську), що дозволить користувачам вибирати мову інтерфейсу.

6. Оптимізація продуктивності: використання сучасних підходів до оптимізації SPA, таких як код-спліттинг, відкладене завантаження компонентів, оптимізація перерисовок та кешування даних.

Вимоги до продуктивності та оптимізації

1 Код-спліттинг: додаток має підтримувати розділення коду на окремі частини (чанки), які завантажуються лише тоді, коли вони дійсно забезпечити швидкий запуск додатка.

2 Відкладене завантаження (Lazy Loading): компоненти, які не є критично важливими для початкового завантаження сторінки, мають бути завантажені лише тоді, коли користувач взаємодіє з відповідною частиною додатка. Це дозволить зменшити навантаження на мережу і прискорити перше завантаження сторінки.

3 Оптимізація перерисовок: використання `React.memo()`, `useMemo()`, та `useCallback()` для уникнення зайвих перерисовок компонентів, що покращить загальну продуктивність додатка. Також необхідно розбивати стан на дрібніші частини для зменшення кількості перерисовок.

4 Віртуалізація списків: для рендерингу списків статей або коментарів має використовуватись віртуалізація з використанням таких бібліотек, як `React Virtualized` або `React Window`. Це дозволить зменшити навантаження на браузер при роботі з великими обсягами даних.

5 Кешування запитів: для зменшення навантаження на сервер і підвищення продуктивності має використовуватись `RTK Query` для кешування запитів до API. Це дозволить зберігати результати запитів і уникати повторного запиту до сервера для одних і тих самих даних, що знижує затримки і покращує користувацький досвід.

6 `Service Workers`: використання `Service Workers` для кешування статичних ресурсів додатка та забезпечення офлайн-режиму. Це дозволить користувачам мати доступ до статей навіть за відсутності інтернет-з'єднання, покращуючи загальну зручність використання додатка.

7 Управління станом: використання `Redux Toolkit` або `Zustand` для управління станом додатка. Це дозволить організувати структуру стану, розділити його на окремі частини, забезпечити асинхронні операції та зменшити кількість повторних рендерів.

Нефункціональні вимоги

1. Кросбраузерність: додаток має коректно працювати у всіх сучасних браузерах (Chrome, Firefox, Safari, Edge).

2. Реагування на зміну розміру екрану: підтримка адаптивного дизайну для коректної роботи як на настільних комп'ютерах, так і на мобільних пристроях.

3. Безпека: забезпечення безпеки даних користувачів, включаючи шифрування паролів та захист від атак типу `CSRF` та `XSS`.

Для розробки блог-додатка з урахуванням усіх вимог необхідно використовувати сучасні інструменти і підходи для оптимізації продуктивності. Код-спліттинг, відкладене завантаження, оптимізація перерисовок, віртуалізація списків і кешування запитів дозволять створити високопродуктивний, стабільний і зручний для користувачів додаток, який відповідає сучасним вимогам до веб-розробки. Цей підхід забезпечить якісну взаємодію з користувачами та високий рівень задоволеності від роботи з додатком.

Опис архітектури додатку

`Feature Slice Design` — це архітектурний підхід до розробки додатків, який забезпечує модульність, ізолюваність та ефективність шляхом розподілу додатка на окремі функціональні слайси (`feature slices`). Кожен слайс представляє окрему бізнес-логічну частину додатка і включає в себе всі необхідні елементи для реалізації цієї частини, такі як компоненти інтерфейсу, логіка управління станом, стилі, запити до API та інші ресурси. Цей підхід дозволяє краще організувати проект, забезпечити незалежність модулів, що, в свою чергу, значно полегшує підтримку та масштабування додатка.

`Feature Slice Design` відрізняється від традиційної організації проектів, де код розподіляється за типами файлів (наприклад, окремі папки для компонентів, стилів, тестів і т.д.). Замість цього, у `Feature Slice Design` додаток розбивається на логічні функціональні блоки, де кожен слайс об'єднує всі типи файлів, необхідних для його роботи. Це дозволяє забезпечити високу когезію і низьке зв'язування між частинами додатка, що покращує модульність і знижує складність коду.

Основні Принципи Feature Slice Design

1. Модульність та ізолюваність: Кожен слайс повністю ізолюваний від інших, що дозволяє уникати взаємозалежностей та робить додаток більш стабільним і передбачуваним.

2. Зручність підтримки: Зміни в одному слайсі не впливають на інші частини додатка, тому внесення нових функцій або виправлення помилок стає швидшим і простішим.

3. Командна робота: Завдяки ізоляції функціональних частин, розробники можуть одночасно працювати над різними слайсами без ризику виникнення конфліктів у коді.

У контексті блог-додатка `Feature Slice Design` є ідеальним рішенням для організації коду і забезпечення масштабованості. Блог-додаток має кілька ключових функціональних областей, таких як управління статтями, коментарями, користувачами та навігацією. Кожна з цих областей може бути реалізована як окремий слайс, що дозволяє зосередити всі пов'язані з конкретною функціональністю ресурси в одному місці.

Оптимізація через Feature Slice Design

`Feature Slice Design` не тільки сприяє покращенню структури додатка, але й значно спрощує процес оптимізації. Ось як цей підхід дозволяє підвищити продуктивність блог-додатка:

1 Код-спліттинг (Code Splitting): Кожен слайс може бути реалізований як окремий чанк, що дозволяє завантажувати тільки необхідні початковий обсяг коду, який завантажується, і покращує швидкість роботи додатка. Наприклад, компоненти, що відповідають за редагування статті, завантажуються тільки тоді, коли користувач переходить до редагування.

2 Відкладене завантаження (Lazy Loading): У кожному слайсі можна реалізувати відкладене завантаження компонентів і даних, які не є критичними для початкового відображення сторінки. Це дозволяє зменшити навантаження на браузер та покращити користувацький досвід. Наприклад, список коментарів можна завантажувати лише тоді, коли користувач прокручує сторінку до кінця статті.

3 Локалізоване управління станом: Кожен слайс має свої власні редюсери та дії, що забезпечує локалізацію стану і запобігає зайвим перерисовкам компонентів. Це особливо важливо для великих додатків, де зменшення кількості перерисовок значно впливає на загальну продуктивність. Використання таких бібліотек, як Redux Toolkit або Zustand, дозволяє створювати ізольовані сховища для кожного слайсу, забезпечуючи швидкий доступ до даних і легкість управління ними.

4 Віртуалізація списків (List Virtualization): Для компонентів, що відображають великі списки даних, таких як статті або коментарі, можна використовувати бібліотеки на кшталт React Virtualized або React Window. Віртуалізація допомагає уникнути зайвого рендерингу невидимих елементів і покращити продуктивність додатка.

5 Кешування запитів (Caching): Завдяки локалізованій структурі кожного слайсу, можна ефективно використовувати RTK Query для кешування запитів до API. Це дозволяє уникнути повторних запитів до серверу і використовувати закешовані дані, що покращує швидкість завантаження сторінок і знижує навантаження на сервер.

Переваги Feature Slice Design для Блог-Додатка

1. Масштабованість: Кожен функціональний модуль додатка розробляється незалежно, що дозволяє легко додавати нові можливості або змінювати існуючі без впливу на інші частини додатка.

2. Полегшена підтримка: Оскільки кожен слайс ізольований, підтримувати та оновлювати код стає набагато легше. Це також зменшує ймовірність виникнення помилок під час внесення змін.

3. Ефективність розробки: Команди можуть одночасно працювати над різними частинами додатка, не перетинаючись між собою і не створюючи конфліктів у коді. Це значно пришвидшує процес розробки і забезпечує високу продуктивність роботи.

Опис структурних компонентів FSD

Feature Slice Design передбачає розподіл функціональних частин додатка на окремі структурні елементи, такі як Widgets, Pages, Shared, Features, App, та Entities. Кожен із цих елементів відіграє свою роль у створенні модульного та масштабованого додатка, що дозволяє ефективно організувати код і забезпечити його підтримку. Розглянемо кожен із цих елементів детальніше.

Widgets — це невеликі, переважно універсальні компоненти, які використовуються в багатьох місцях додатка для повторюваних елементів інтерфейсу. Вони можуть включати(рис.1) кнопки, інпут-форми, невеликі картки або інформаційні блоки. Відмінність виджетів від інших компонентів полягає в тому, що вони не мають специфічної бізнес-логіки, а виконують лише одну універсальну функцію, наприклад, відображення інтерфейсного елементу.

Widgets використовуються в різних частинах додатка і можуть бути інтегровані у Features або Pages. Їхня модульність і багаторазове використання робить їх важливим елементом для створення уніфікованого дизайну та функціональності додатка.

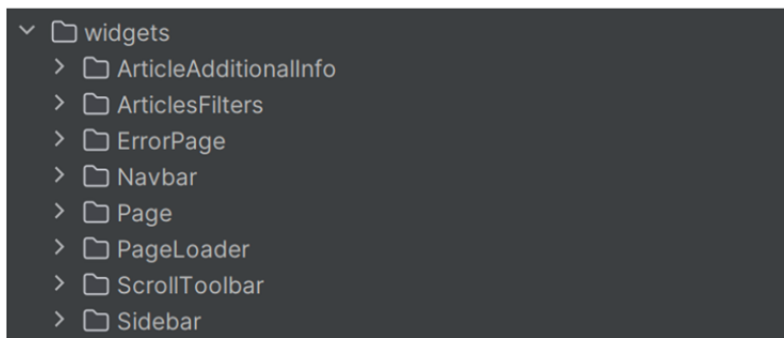


Рисунок 1 – Структура Widgets

Figure 1 – Structure of Widgets

Pages — це кінцеві компоненти, які зв'язують усі інші елементи додатка разом і забезпечують взаємодію користувача з різними функціями. Кожна сторінка реалізує певний сценарій використання, такий як перегляд статті, редагування профілю або створення нового допису. Вони часто об'єднують кілька різних слайсів або функціональних частин у рамках одного інтерфейсу. Наприклад(рис.2), сторінка статті може включати основний контент статті, список коментарів, віджети для навігації та додаткові елементи, такі як авторський блок.

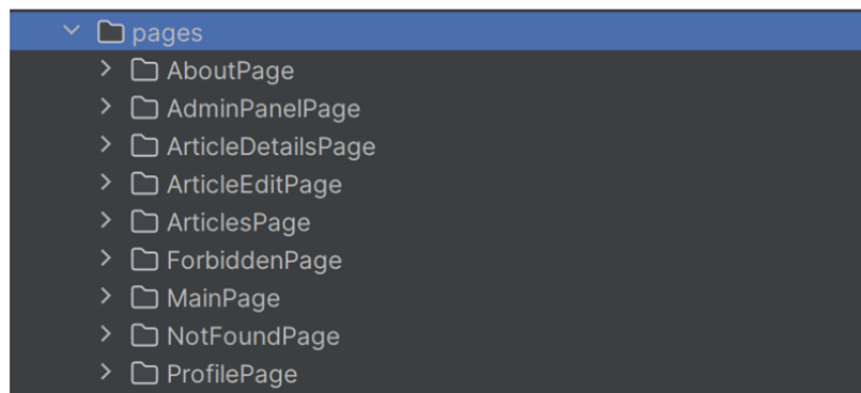


Рисунок 2 – Структура Pages
Figure 2 – Structure of Pages

Shared — це модуль, який містить загальні ресурси, що можуть використовуватися в різних частинах додатка. Це можуть бути(рис. 3) утиліти, загальні компоненти, константи, типи даних, стилі, а також API-запити, які можуть бути потрібні в багатьох місцях додатка. Модуль Shared дозволяє зменшити дублювання коду і забезпечити централізоване зберігання загальних ресурсів. Наприклад, у Shared можуть знаходитися компоненти, такі як кнопки, модальні вікна або навіть інструменти для роботи з датами, які використовуються в декількох слайсах. Це значно полегшує підтримку і дозволяє швидко змінювати загальні елементи у всьому додатку.

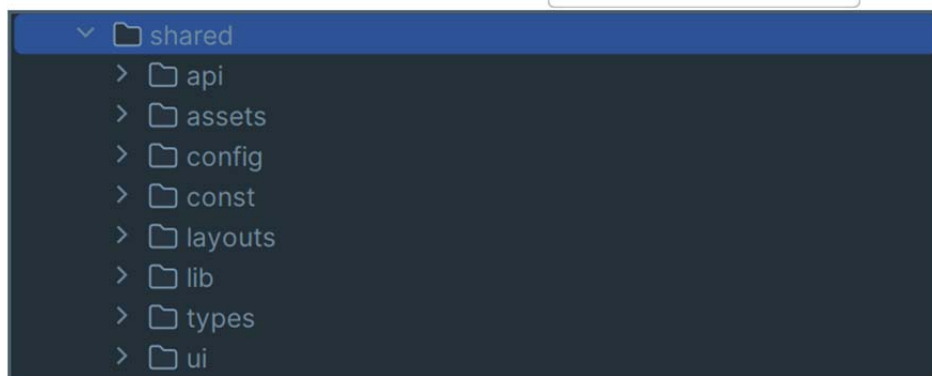


Рисунок 3 – Структура Shared
Figure 3 – Shared structure

Features — це ключові функціональні модулі додатка, що реалізують певні бізнес-логічні можливості. Кожна Feature включає(рис. 4) всі необхідні елементи для реалізації конкретної функціональності: компоненти, управління станом, стилі та API-запити. Наприклад, Feature для керування статтями (Articles Feature) може включати компоненти для створення, редагування, перегляду статей, а також логіку управління станом і запити до API для отримання або збереження даних. Features можуть бути інтегровані на різних сторінках, і їхня ізольованість забезпечує простоту додавання нової функціональності без впливу на інші частини додатка. Це робить додаток більш стабільним і передбачуваним у підтримці.

App — це модуль, який включає загальну конфігурацію та інфраструктуру всього додатка. Це місце, де знаходиться головна точка входу додатка, маршрутизація (наприклад, за допомогою React Router), а також глобальні налаштування, такі як тема, налаштування контексту або загальні перехоплювачі помилок.

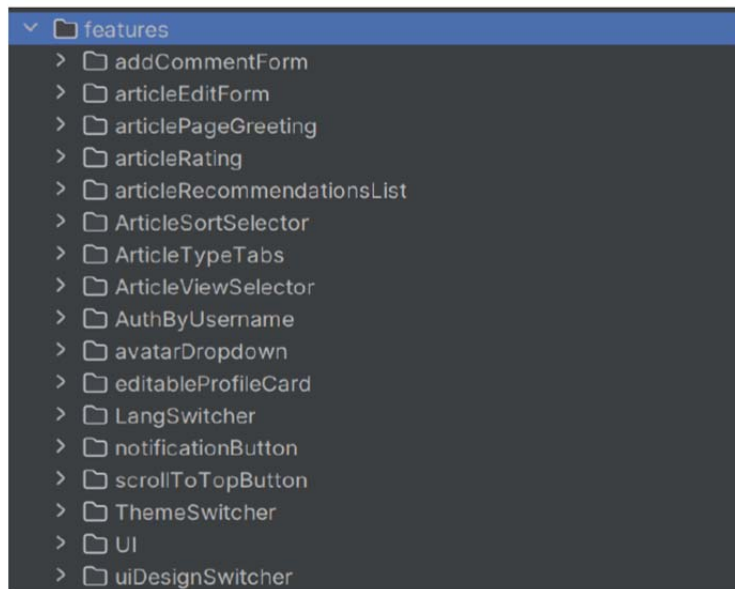


Рисунок 4 – Структура Features

Figure 4 – Structure of Features

App модуль також відповідає за ініціалізацію ключових частин додатка(рис. 5), включаючи інтеграцію з API, налаштування управління станом і глобальні події. Це основа, на якій будується весь додаток, і вона забезпечує зв'язок між різними компонентами та модулями.

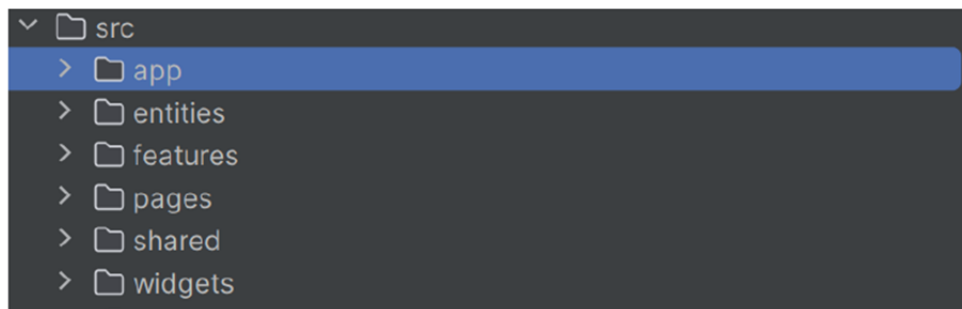


Рисунок 5 – Структура App

Figure 5 – App structure

Entities — це модуль, який включає моделі даних та всю логіку, пов'язану зі зберіганням і обробкою даних, які представляють бізнес-сутності додатка. Наприклад (рис. 6), для блог-додатка це можуть бути сутності, такі як Article, User, Comment.

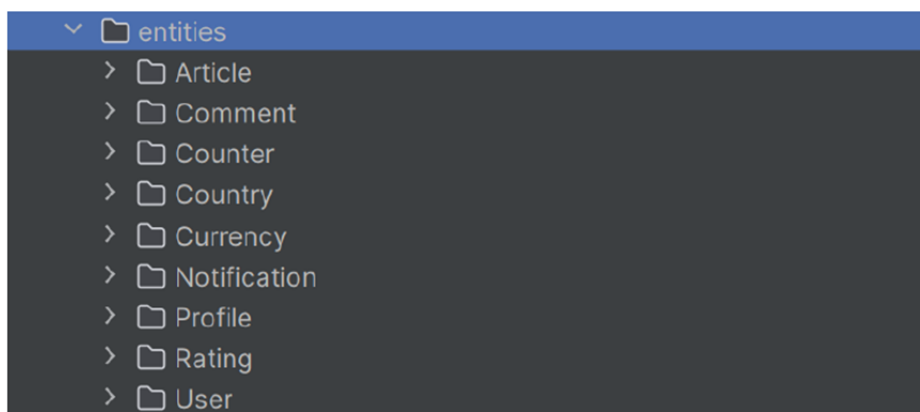


Рисунок 6 – Структура Entities

Figure 6 – Structure of Entities

Кожна з цих сутностей містить логіку, яка дозволяє працювати з даними, включаючи CRUD-операції (створення, читання, оновлення, видалення).

Entities забезпечують централізовану обробку даних, що дозволяє зберігати код, який пов'язаний зі взаємодією із сервером або маніпуляціями з даними, в одному місці. Це забезпечує кращу підтримку і дозволяє легко оновлювати моделі даних у разі зміни бізнес-вимог.

Feature Slice Design є потужним підходом до організації архітектури додатків, особливо для великих і складних проєктів, таких як блог-додаток. Цей підхід не тільки забезпечує модульність та ізолюваність функціональних частин (рис. 7), але й дозволяє ефективно оптимізувати додаток, що забезпечує швидкий, стабільний і зручний користувацький досвід.

Для зберігання конфігурацій, даних користувачів та контенту блогу використовується json-server, який виступає як легка база даних у форматі JSON. Це рішення дозволяє швидко налаштувати API для тестування додатка та зберігати всі дані у простому форматі. База даних складається з наступних колекцій: notifications, articles, comments, users, profile, article-ratings, та profile-ratings. Кожна з цих колекцій представляє різні типи даних, які необхідні для роботи додатка.



Рисунок 7 – Глобальна структура папок

Figure 7 – Global folder structure

Висновок. Під час розробки інформаційної системи ключовим аспектом є чітке визначення задачі та вимог до системи. Ми розглянули основні вимоги до системи, зокрема її функціональні можливості, обмеження та цілі, що допомагають сформулювати чітке уявлення про кінцевий продукт. Визначення вимог дозволяє забезпечити узгодженість між різними учасниками проєкту та сприяє реалізації цілісного підходу до розробки. Опис архітектури додатку дав змогу чітко структурувати проєкт, що забезпечує масштабованість і зручність у підтримці. Опис архітектури дозволяє бачити, як взаємодіють різні компоненти системи, а також сприяє ефективній декомпозиції складних функціональностей. Архітектура визначає, як інтегруються модулі, як зберігаються та обробляються дані, а також як забезпечується ефективність і стабільність роботи додатка.

База даних є фундаментальним елементом для зберігання інформації та забезпечення її цілісності. Дизайн бази даних визначає, як дані структуровані та зберігаються, що дозволяє забезпечити швидкий доступ і легкість у їхній обробці. Використання JSON як бази даних у нашому проєкті сприяло швидкій реалізації MVP та гнучкому управлінню даними, що дозволяє швидко змінювати структуру на етапі розробки.

Таким чином, кожен із розглянутих аспектів відіграє важливу роль у створенні масштабованої та якісної інформаційної системи. Від правильно поставленої задачі та побудованої архітектури до впровадження інструментів автоматизованої перевірки якості коду, тестування компонентів і використання бази даних — усе це забезпечує створення стабільного, функціонального та зручного продукту. Інтеграція сучасних технологій і підходів дозволяє зменшити витрати на підтримку, збільшити швидкість розробки та забезпечити відповідність додатка вимогам користувачів і бізнесу

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дуглас Крокфорд. JavaScript: Сильні сторони. – Харків: Видавництво "Фактор", 2018. – 200 с.
2. Deshmukh S. Building a Single Page Application Web Front-end for E-Learning site [Електронний ресурс] / S. Deshmukh, A. Retawade, D. Mane – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8819703/authors#authors>.
3. React Documentation. [Онлайн ресурс] – Режим доступу: <https://reactjs.org/docs/getting-started.html>

4. Jest Documentation. [Онлайн ресурс] – Режим доступу: <https://jestjs.io/docs/getting-started>
5. Analyzing best practices on Web development frameworks: The lift approach [Електронний ресурс] / [M. PilarSalas-Zárate, G. Alor-Hernández, R. Valencia-García та ін.] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167642314005735>.
6. Babel Documentation. [Онлайн ресурс] – Режим доступу: <https://babeljs.io/docs/en/>

REFERENCES

1. Douglas Crockford. JavaScript: Strengths. – Kharkiv: "Faktor" Publishing House, 2018. – 200 p.
2. Deshmukh S. Building a Single Page Application Web Front-end for E-Learning site [Electronic resource] / S. Deshmukh, A. Retawade, D. Mane – Resource access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8819703/authors#authors> .
3. React Documentation. [Online resource] – Access mode: <https://reactjs.org/docs/getting-started.html>
4. Jest Documentation. [Online resource] – Access mode: <https://jestjs.io/docs/getting-started>
5. Analyzing best practices on Web development frameworks: The lift approach [Electronic resource] / [M. PilarSalas-Zárate, G. Alor-Hernández, R. Valencia-García, et al.] – Resource access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167642314005735> .
6. Babel Documentation. [Online resource] – Access mode: <https://babeljs.io/docs/en/>

РЕФЕРАТ

Безверхий О.І. Проектування оптимізованого блог-додатку / О.І. Безверхий, О.С. Дедул // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У роботі проаналізовано сучасні технології оптимізації front-end розробки, включаючи налаштування інфраструктури проекту, модульну архітектуру та підходи до оптимізації продуктивності. Досліджено використання інструментів для конфігурації проекту, таких як Webpack, Vite, та Babel, з метою зменшення розміру бандла та підвищення швидкодії. Впроваджено оптимізацію за допомогою code splitting, lazy loading та кешування запитів.

Об'єкт дослідження: процес оптимізації front-end розробки у сучасних блог-додатках. Мета роботи: дослідити сучасні методи та технології оптимізації процесів front-end розробки, їх інтеграцію в реальний проект та оцінити ефективність впроваджених рішень. У роботі проаналізовано сучасні підходи до організації інфраструктури front-end проектів, включаючи використання модульних систем, а також гнучких підходів до конфігурації середовища розробки. Розроблено комплексну архітектуру для масштабованих веб-додатків, яка базується на принципах модульності, слабкої зв'язаності та повторного використання компонентів. Здійснено конфігурацію проекту з використанням таких інструментів, як ESLint для лінтингу коду, Jest для тестування, JSON Server для емуляції API, TypeScript для статичної типізації, а також React для створення користувацького інтерфейсу. Досліджено методи оптимізації бандла, включаючи розділення коду (code splitting), лінійне завантаження (lazy loading) та використання бандл-аналізаторів. Це дозволило визначити найбільш ефективні методи для створення оптимальної інфраструктури, яка підтримує гнучкість, масштабованість і зручність розробки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: FRONT-END, ОПТИМІЗАЦІЯ, WEBPACK, VITE, BABEL, TYPESCRIPT, UI-КОМПОНЕНТИ, ТЕМІЗАЦІЯ, I18N, LAZY LOADING, CODE SPLITTING, REDUX, ENTITYADAPTER, REACT, STORYBOOK, СКРИНШОТНІ ТЕСТИ, МОДУЛЬНА АРХІТЕКТУРА, АСИНХРОННІ РЕДЮСЕРИ.

ABSTRACT

Bezverhiy O.I Dedul O.S.. Design of the application for management of software development processes. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The paper analyzes modern front-end development optimisation technologies, including project infrastructure configuration, modular architecture, and performance optimisation approaches. The use of

project configuration tools, such as Webpack, Vite, and Babel, to reduce bundle size and improve performance is investigated. Optimisation using code splitting, lazy loading, and request caching was implemented.

Object of study: the process of optimizing front-end development in modern blog applications. Purpose: to investigate modern methods and technologies for optimizing front-end development processes, their integration into a real project, and to evaluate the effectiveness of the implemented solutions. The paper examines contemporary approaches to organizing the infrastructure of front-end projects, including the utilization of modular systems and flexible configurations for the development environment. A comprehensive architecture for scalable web applications based on the principles of modularity, loose coupling, and component reuse is developed. The project was configured using tools such as ESLint for code linting, Jest for testing, JSON Server for API emulation, TypeScript for static typing, and React for creating a user interface. The methods of bundle optimization, including code splitting, lazy loading, and the use of bundle analyzers, were investigated. This allowed us to identify the most effective methods for creating an optimal infrastructure that supports flexibility, scalability, and ease of development.

KEYWORDS: FRONT-END, OPTIMISATION, WEBPACK, VITE, BABEL, TYPESCRIPT, UI COMPONENTS, THEMING, I18N, LAZY LOADING, CODE SPLITTING, REDUX, ENTITYADAPTER, REACT, STORYBOOK, SCREENSHOT TESTS, MODULAR ARCHITECTURE, ASYNCHRONOUS EDITORS.

АВТОРИ:

Безверхий Олександр Ігорович, д.ф.-м.н., професор, Національний транспортний університет професор кафедри інформаційних систем і технологій, Київ, Україна, e-mail: o_bezver@ukr.net, тел. +380666791995, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 351, orcid.org/0000-0002-0834-6335.

Дедул Олександр Станіславович, Національний транспортний університет, студент групи КНМ-2-1 факультету транспортних та інформаційних технологій, Київ, Україна, e-mail: sasha15200201@gmail.com, тел. +380680937561, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0009-0009-1722-2869.

AUTHORS:

Bezverkhyy Oleksandr I., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, National Transport University Professor of the Department Information Systems and Technologies, Kyiv, Ukraine, e-mail: o_bezver@ukr.net, tel. +380666791995, Ukraine, 01010, Kyiv, str. Omelyanovich-Pavlenka, 1, room 351, orcid.org/0000-0002-0834-6335.

Dedul Oleksandr S., National Transport University, student of the KNm-2-1 group of the Faculty of Transport and Information Technologies, sasha15200201@gmail.com, , tel. +380680937561, Ukraine, 01010, Kyiv, str. Omelyanovich-Pavlenka, 1, orcid.org/0009-0009-1722-2869.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гавриленко Валерій Володимирович., д-ф.м-н., професор, Національний транспортний університет, Київ, Україна.

Івохін Євген Вікторович., д-ф.м-н., професор, Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Gavrilenko Valeriy Volodymyrovych, Doctor of Physical and Mathematical sciences, professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine.

Ivohin Evgen Viktorovych, Doctor of Physical and Mathematical sciences, professor, National university Taras Shevchenko, Kyiv, Ukraine.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Будниченко І.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна, repair2006@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3073-4913

EXPERIMENTAL STUDIES ON VEHICLE MOTION RESISTANCE

Budnychenko I.V., National Transport University, Kyiv, Ukraine, repair2006@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3073-4913

Постановка проблеми

Україна має одну із розвинутих систем громадського транспорту, в якій пасажирські перевезення в містах здійснюються транспортними засобами з електричною тяговою установкою. Нещодавно прийнятим Законом України [1] передбачається її подальший розвиток за рахунок заміни транспортних засобів з тяговими силовими устаткуваннями, що мають двигуни внутрішнього згорання на транспортні засоби з електричними тяговими установками.

В умовах, коли в наслідок бойових дій мають місце пошкодження енергогенеруючою устаткування енергетичної системи України, особливо важливою стає проблема енергозберігаючої діяльності на транспорті, що передбачає діяльність, яка спрямована на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії. Енергоефективність згідно закону України [2] є кількість енергетичних ресурсів, які витрачаються на виконання заданого обсягу роботи.

Окремо зазначимо, що на даний час не існує нормативного документу згідно яким має бути оцінена енергоефективність транспортного засобу з електричною тяговою установкою транспортних засобів категорії М2, М2 класів В,Б та І, ІІ. Розроблення методу оцінювання енергоефективності таких транспортних засобів потребує розгляду окремих складових, які впливають на витрати енергоносія, серед яких є опір руху транспортного засобу.

Аналіз відомих нам публікацій показує, що на даний час основні дослідження виконувалися в напрямку оцінювання впливу експлуатаційних чинників на витрату енергоносія транспортним засобом з електричною тяговою установкою, наприклад в роботах [3,4].

Окремо зазначимо, що достатньо велика кількість досліджень для транспортних засобів з електричною тяговою установкою присвячена визначенню характеристик його електричного приводу та управління ним [5,6,7,8,9,10].

Метою досліджень, які передбачається виконати, є експериментальне визначення опору руху транспортного засобу з електричною тяговою установкою категорії М3, класу І, як однієї із складових, яка впливає на його енергоефективність.

Для досягнення означеної вище мети роботи повинні бути вирішені наступні завдання:

- виконання вимірювання зміни швидкості уразі руху транспортного засобу без тяги під дією сили опору руху;
- розроблення та застосування методики порівняльного аналізу отриманих даних для підтвердження або спростування гіпотези про залежність опору руху від швидкості транспортного засобу;
- визначення питомого показника витрати енергоносія на долаття опору руху.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Експериментальні дослідження опору руху були виконані на транспортних засобах з електричною тяговою установкою, а саме тролейбусах типу АКСМ-321, Т12120 технічні характеристики яких можуть вплинути на значення опору руху подані в таблиці 1.

Вимірювання опору руху виконувалося не прямим методом за показником зміни швидкості в часі під час руху тролейбуса без тяги по горизонтальній ділянці дороги, що має асфальтобетонне покриття та довжину приблизно 500 м. Для виконання вимірювання зміни швидкості в часі було застосовано засіб вимірювальної техніки типу ВЕГС-01, який був наданий ТОВ «ПОЛІТЕХНОСЕРВІС» і призначений для вимірювання ефективності гальмових систем транспортних засобів. Прилад типу ВЕГС-01 має у своєму складі високоточний GPS модуль типу ZED-F9P F9 (див.рис.1), адаптер, датчик ходу педалі та програмний продукт (див.рис.2), який інсталюється на будь-якому комп'ютері.

Таблиця 1
Table 1

Технічні характеристики	Типи тролейбусів	
	АКСМ -231	T12120
Габаритні розміри, м		
- довжина	12,3	12,0
- ширина	2,5	2,55
- висота	3,7	3,5
Кількість осей	2	2
Кількість тягових двигунів	1	1
Тип двигуна	асинхронний	асинхронний
Розміри шин коліс	275/70 R22,5	275/70 R22,5
Маса у спорядженому стані, т	11,4	10,860



Рисунок 1 – Високоточний GPS модуль
Figure 1 – High-precision GPS module

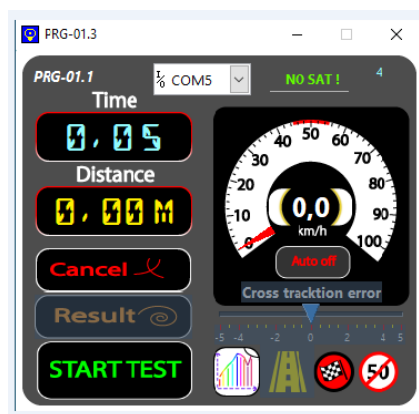


Рисунок 2 – Віртуальна панель керування приладом
Figure 2 – Virtual device control panel

Високоточний GPS модуль типу ZED-F9P F9, закріплюється на будь яку металеву поверхню кузова або салону транспортного засобу.

Застосування ВЕГС-01 дозволило отримати масив даних про зміну швидкості транспортного засобу через кожні 0,1 с його руху без тяги, які показані на рис. 3,5. Наявність масиву даних функції $v(t)$ дозволило отримати масив даних функції уповільнення $J(v)$, а саме:

$$J(v) = \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

де dt – прийняти інтервал часу 2 с.

В подальшому розглядалося лінійна та нелінійна залежність уповільнення від швидкості транспортного засобу, які мали вигляд поліному першого та другого ступеню.

$$J(v) = b_0 + b_1V \quad (2)$$

$$J(v) = b_0 + b_1V + b_1V^2 \quad (3)$$

Значення коефіцієнтів рівнянь 2,3 та їх статистичні характеристики були визначенні із застосуванням функції «ЛИНЕЙН» Microsoft Excel та подані у таблиці 2.

На рис. 4,6 показані зміни фактичні миттєві значення сповільнення та теоретичні значення в залежності від швидкості транспортного засобу.

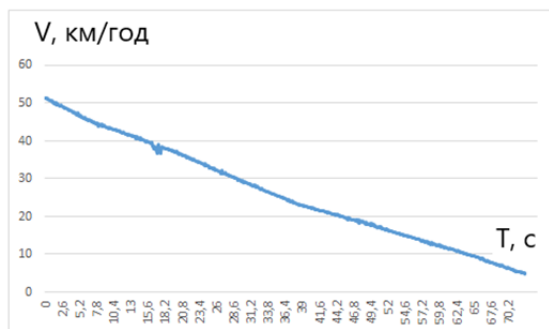


Рисунок 3 – Зміна швидкості тролейбуса АКСМ
Figure 3 – Changing the speed of the AKCM trolleybus

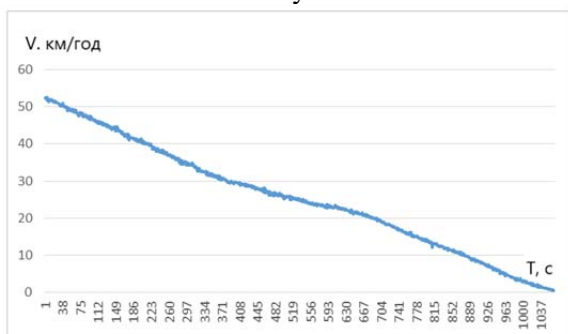


Рисунок 5– Зміна швидкості тролейбуса Т12120
Figure 5 – Changing the speed of the T12120 trolleybus

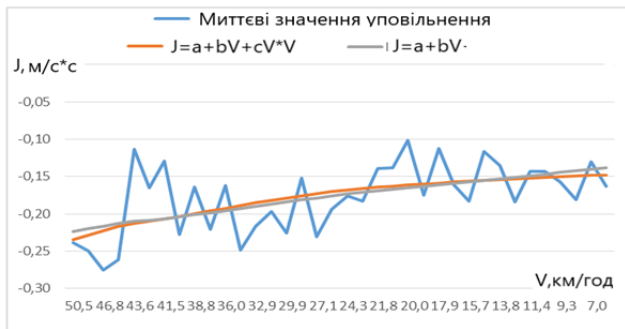


Рисунок 4 – Зміна уповільнення тролейбуса АКСМ
Figure 4 – Change in deceleration of the AKCM trolleybus

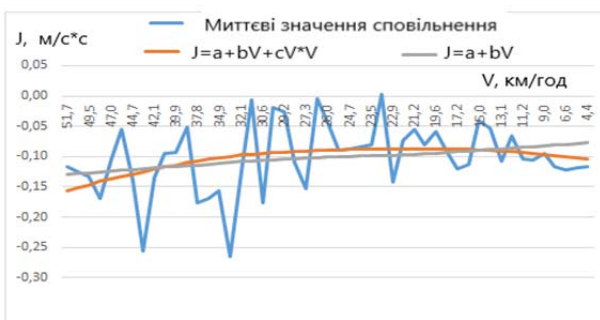


Рисунок 6 – Зміна уповільнення тролейбуса Т12120
Figure 6 – Changing the speed of the T12120 trolleybus

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів поліномів та їх статистика
Table 2 – Values of coefficients of polynomials and their statistics

Параметр	АКСМ-231		Т12120	
Коефіцієнт b_0	0,14610	0,12682	-0,1159	-0,0725
Стандартне відхилення коефіцієнту S_{b0}	0,02950	0,01466	0,0536	0,017984
Коефіцієнт b_1	0,00011	0,00191	0,0028	-0,001097
Стандартне відхилення коефіцієнту S_{b1}	0,00244	0,03895	0,0026	0,000594
Коефіцієнт b_2	0,00003	-	0,00007	-
Стандартне відхилення коефіцієнту S_{b2}	0,00004	-	0,00004	-
Кількість ступенів свободи, n	33	34	46	47
Критерій Фішера F	7,63	14,89	3,01	3,4
Унормоване значення F , для $P=0,95$	2,88	2,87	2,81	2,81
Коефіцієнт детермінації, R	0,316	0,306	0,1157	0,067
Унормоване значення R для $P=0,95$	0,194	0,128	0,128	0,0837

Аналіз статистики, що подана у таблиці 2 дає можливість зазначити, що для тролейбусів типу:

– АКСМ може бути застосований поліном першого та другого ступеню, але в обох математичних моделях вплив швидкості на уповільнення несуттєвий, так як значення коефіцієнтів не перевищує похибку їх визначення;

– Т12120 відсутній вплив швидкості руху на уповільнення, так як коефіцієнт детермінації менше критичного значення.

Це дозволяє під час подальших досліджень витрати енергоносія транспортного засобу з електричною тяговою установкою вважати опір руху сталою величиною.

Висновки.

Запропоновані математичні моделі визначення уповільнення транспортного засобу під час руху без тяги в наслідок дії сил опору та отримана статистика цього процесу дозволяє вважати, що сила опору руху в інтервалі швидкості до 50 км/год є сталою величиною, так як значення коефіцієнтів впливу швидкості на уповільнення не перевищують похибки їх визначення.

Перспективи подальшого дослідження

Подальші дослідження мають бути спрямовані на отримання аналогічних математичних моделей для інших типів транспортних засобів з електричною тяговою установкою, що вони можуть бути застосовані і для інших транспортних засобів, а їх опір руху є сталою величиною в інтервалі швидкості до 50 км/год.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Закон України «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів» від 24 лютого 2023 року № 2956-IX // Відомості Верховної Ради (ВВР), 2023, № 61, ст.203.

2 Закон України «Про енергоефективність» від 21.10.2021 № 1818--IX// Відомості Верховної Ради України, 2022 р. – № 2. – Ст.8.].

3 Dembitskyi V. Influence of a system «vehicle – driver – road – environment» on the energy efficiency of the vehicles with electric drive / Valerii Dembitskyi, Oleg Sitovskyi, Vasyl Pavliuk // Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, 2019. — Tern. : TNTU, Scientific Publishing House «SciView», 2019. — P. 162–173. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28705> (Web of Science).

4 Дембіцький Валерій. Дослідження енергетичних показників транспортних засобів з електричним приводом. Монографія / за заг. ред. Д.В. Ломотька. – Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г.М. – 2022. Т1 – 216 с. (с. 77 – 114).

5 Weiss, M., Cloos, K.C. & Helmers, E. Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. Environ Sci Eur 32, 46 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00307-8>

6 Haakana A, Laurikko J, Granström R, Hagman R (2013) Assessing range and performance of electric vehicles in Nordic driving conditions—End of Project Report. Nordisk Energieforskning, December 2013, pp 74. <https://docplayer.net/11036905-Assessing-range-and-performance-of-electric-vehicles-in-nordic-driving-conditions-project-final-report.html>

7 Zhao Y, Hou J, Wang C, Chen L, Sun Q. Design of vehicle control research and development platform for a pure electric vehicle. Advances in Mechanical Engineering. February 2019. doi:10.1177/1687814019826427.

8 Carlson R, Lohse-Busch H, Diez J, Gibbs J (2012) The measured impact of vehicle mass on road load forces and energy consumption for a BEV, HEV, and ICE vehicle. SAE International 2013-0-1457.

9 Helmbrecht M, Olaverri-Monreal C, Bengler K, Vilimek R, Keinath A (2014) How electric vehicles affect driving behavioral patterns. IEEE Intell Transp Syst Mag 6(3):22–32.

10 Zhao C, Gong G, Yu C, Liu Y, Zhong S, Song Y, Deng C, Zhou A, Ye H (2019) Research on key factors for range and energy consumption of electric vehicles. SAE Technical Paper 2019-01-0723, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0723>

REFERENCES

1 Law of Ukraine «On Some Issues of the Use of Vehicles Equipped with Electric Engines and Amendments to Some Laws of Ukraine on Overcoming Fuel Dependence and the Development of Electric Charging Infrastructure and Electric Vehicles» dated February 24, 2023 No. 2956-IX // Bulletin of the Verkhovna Rada (VVR), 2023, No. 61, Art. 203.

2 Law of Ukraine «On Energy Efficiency» dated October 21, 2021 No. 1818--IX// Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine, 2022 – No. 2. –Art. 8.].

3 Dembitskyi V. Influence of a system «vehicle – driver – road – environment» on the energy efficiency of the vehicles with electric drive / Valerii Dembitskyi, Oleg Sitovskyi, Vasyl Pavliuk // Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, 2019. — Tern. : TNTU, Scientific Publishing House «SciView», 2019. — P. 162–173. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28705> (Web of Science).

4 Dembitsky Valeriy. Research on energy indicators of electric vehicles. Monograph / edited by D.V. Lomotka. – Academy of Technical Sciences of Ukraine. – Ivano-Frankivsk: Publisher Kushnir G.M. – 2022. T1 – 216 p. (pp. 77 – 114).

5 Weiss, M., Cloos, K.C. & Helmers, E. Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. *Environ Sci Eur* 32, 46 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00307-8>

6 Haakana A, Laurikko J, Granström R, Hagman R (2013) Assessing range and performance of electric vehicles in Nordic driving conditions—End of Project Report. Nordisk Energieforskning, December 2013, pp 74. <https://docplayer.net/11036905-Assessing-range-and-performance-of-electric-vehicles-in-nordic-driving-conditions-project-final-report.html>

7 Zhao Y, Hou J, Wang C, Chen L, Sun Q. Design of vehicle control research and development platform for a pure electric vehicle. *Advances in Mechanical Engineering*. February 2019. doi:10.1177/1687814019826427.

8 Carlson R, Lohse-Busch H, Diez J, Gibbs J (2012) The measured impact of vehicle mass on road load forces and energy consumption for a BEV, HEV, and ICE vehicle. SAE International 2013-0-1457.

9 Helmbrecht M, Olaverri-Monreal C, Bengler K, Vilimek R, Keinath A (2014) How electric vehicles affect driving behavioral patterns. *IEEE Intell Transp Syst Mag* 6(3):22–32.

10 Zhao C, Gong G, Yu C, Liu Y, Zhong S, Song Y, Deng C, Zhou A, Ye H (2019) Research on key factors for range and energy consumption of electric vehicles. SAE Technical Paper 2019-01-0723, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0723>

РЕФЕРАТ

Будниченко І.В. Експериментальні дослідження опору руху транспортного засобу / І.В. Будниченко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У статті запропонована математична модель зміни уповільнення від швидкості транспортного засобу з електричною тяговою установкою.

Об'єкт дослідження – процес уповільнення транспортного засобу з електричною тяговою установкою під дією сил опору руху.

Мета статті – розробка математичної моделі для визначення опору руху, що дозволяє оцінювати витрати енергоносія на долаття опору руху для виконання порівняння енергоефективності різних типів транспортних засобів з електричною тяговою установкою.

Методи дослідження – експериментальні дослідження впливу сил опору руху на уповільнення транспортного засобу та методи математичної статистики.

Запропонована математична модель встановлює залежність величини сповільнення від швидкості транспортного засобу в діапазоні до 50 км/год, що є максимально дозволеною швидкістю руху в місті.

Результати:

1) модель дозволяє отримати значення сили опору руху за відомої маси транспортного засобу та дозволяє вважати її сталою величиною в діапазоні швидкостей до 50 км/год в наслідок незначних значень коефіцієнтів впливу швидкості на уповільнення транспортного засобу.

2) модель передбачає подальше використання під час визначення показника енергоефективності транспортного засобу з електричною тяговою установкою так як показник опору руху є одним із складових, що впливають на витрату енергоносія.

Практичне значення: результати дослідження мають практичну цінність для підприємств, що виготовляють транспортні засоби, для оцінки їх конкурентоздатності.

Перспективи дослідження: подальші дослідження спрямовані на удосконалення математичної моделі шляхом виконання додаткових експериментальних досліджень інших типів транспортних засобів з електричною тяговою установкою, які виготовляються в Україні.

Ключові висновки:

1) уповільнення транспортного засобу з електричною тяговою установкою в наслідок дії сил опору руху можна вважати сталою величиною в діапазоні швидкостей до 50 км/год.

2) опір руху транспортного засобу з електричною тяговою установкою можна вважати сталою величиною в діапазоні швидкостей до 50 км/год, що має бути ураховано під час розроблення математичної моделі споживання енергоносія під час визначення показника його енергоефективності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ, ОПІР РУХУ, УПОВІЛЬНЕННЯ, РУХ БЕЗ ТЯГИ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

ABSTRACT

Budnychenko I.V. Experimental studies of vehicle rolling resistance. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article proposes a mathematical model of the change in deceleration from the speed of a vehicle with an electric traction unit.

Research object: the process of deceleration of a vehicle with an electric traction unit under the action of rolling resistance forces.

The purpose of the article: to develop a mathematical model for determining rolling resistance, which allows estimating the energy consumption for overcoming rolling resistance to compare the energy efficiency of different types of vehicles with an electric traction unit.

Research methods: experimental studies of the influence of rolling resistance forces on vehicle deceleration and methods of mathematical statistics.

The proposed mathematical model establishes the dependence of the deceleration value on the vehicle speed in the range of up to 50 km/h, which is the maximum permitted speed in the city.

Results:

1) the model allows you to obtain the value of the resistance force for a known vehicle mass and allows you to consider it a constant value in the speed range of up to 50 km/h due to the insignificant values of the coefficients of the influence of speed on the vehicle deceleration.

2) the model provides for further use in determining the energy efficiency index of a vehicle with an electric traction unit, since the resistance index is one of the components that affect the energy consumption.

Practical significance: the results of the study have practical value for enterprises that manufacture vehicles to assess their competitiveness.

Research prospects: further research is aimed at improving the mathematical model by performing additional experimental studies of other types of vehicles with an electric traction unit that are manufactured in Ukraine.

Key conclusions:

1) the deceleration of a vehicle with an electric traction system due to the action of resistance forces can be considered a constant value in the speed range up to 50 km/h.

2) the resistance of a vehicle with an electric traction system can be considered a constant value in the speed range up to 50 km/h, which should be taken into account when developing a mathematical model of energy consumption when determining its energy efficiency indicator.

KEYWORDS: ENERGY EFFICIENCY, VEHICLE, RESISTANCE, DECELERATION, MOTION WITHOUT TRACTION, MATHEMATICAL MODEL

АВТОРИ:

Будниченко Ігор Валерійович, аспірант кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: repair2006@ukr.net, тел. +38(067) 465-57-96, , Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410А, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

AUTHORS:

Budnychenko Igor Valeriyovych, postgraduate student of the Department of Technical Operation of Automobiles and Car Service, e-mail: repair2006@ukr.net, tel. +38(067) 465-57-96, , Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, room 410A, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Кугут Микола Миколайович., директор Товариства з обмеженою відповідальністю «ПОЛІТЕХНОСЕРВІС», Бровари, Україна.

Сахно В.П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри автомобілів, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Kugut Mykola Mykolayovych, Director of the Limited Liability Company «POLITEHNOSERVICE», Brovary, Ukraine.

Sakhno V.P., Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Department of Automobiles, Kyiv, Ukraine.

MODERN APPROACH TO CONDUCTING COMPREHENSIVE TESTING OF LUBRICATING MATERIALS FOR FRICTION UNITS OPERATING IN SERVICE CONDITIONS

Dmytrychenko M.F., doctor of technical science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, dmitrichenko@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0003-4223-1838

Milanenko O.A., doctor of technical science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, milanmasla@gmail.com, orcid.org/0000-0002-8197-5277

Bilyakovich O.N., associate professor State non-commercial company State university «Kyiv aviation institute», Kyiv, Ukraine, oleg65@voliacable.com, orcid.org/0000-0002-2423-2346

Bobro A.M., National Transport University, Kyiv, Ukraine, stormshadow0117@gmail.com, orcid.org/0009-0002-1193-117X

СУЧАСНИЙ ПІДХІД ЩОДО ПРОВЕДЕННЯ КОМПЛЕКСНИХ ВИПРОБУВАНЬ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Дмитриченко М.Ф., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, dmitrichenko@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0003-4223-1838

Міланенко О.А., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, milanmasla@gmail.com, orcid.org/0000-0002-8197-5277

Білякович О.М., кандидат технічних наук, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна, oleg65@voliacable.com, orcid.org/0000-0002-2423-2346

Бобро А.М., Національний транспортний університет, Київ, Україна, stormshadow0117@gmail.com, orcid.org/0009-0002-1193-117X

Analysis of the latest research and publications.

Existing comprehensive studies on the wear resistance and lubrication efficiency (lubricity) of friction units establish the influence of external factors (load, speed, contact kinematics, temperature, etc.) on the durability and operational reliability of both the lubricant and the metal of the contacting surfaces.

Much of the complex experimental research concerns the influence of external factors on the wear resistance of metal surfaces and the efficiency of lubrication of friction units. The results of tribotechnical, rheological, and physicochemical studies are of great importance in the design, manufacture, and operation of machines and the creation of modern lubricant compositions [1, 2].

To obtain reliable test results of lubricants and materials of metal surfaces, reproduction and similarity of results during repeated experiments, a clear structure of the concept of complex design and experimental studies is required, which should contain the following components [3]:

- 1) availability of experimental facilities for conducting the research (scheme and design of the facility);
- 2) selection of research objects (microhardness, mechanical properties, contact shape and roughness of metal friction surfaces, physical, chemical and rheological properties of the lubricant);
- 3) conditions of the study (nature of the load, kinematic and temperature factors);
- 4) mathematical and statistical methods for processing the results of an experimental study.

Outline of unresolved issues.

Since Ukraine's Independence Day, there has been no sectoral technical regulation on the requirements and circulation of lubricants in our country. In European countries and the United States of America, such a document is the main one regulating the requirements for lubricants that are put into circulation and made available on the market within the country in order to ensure energy efficiency, national security, protection of human, animal and plant life and health, environmental protection and natural resources, preservation and protection of property and prevention of business practices that mislead consumers.

The requirements for lubricants (motor, transmission, universal oils) used in vehicles are still regulated either by Soviet standards or by the manufacturer's internal technical specifications. However, the main

technical problem is that the current assessment methods used in qualification tests are 90% based on Soviet standards, which have long been out of step with modern requirements for lubricants.

Only recently, the Working Group has been established to develop a draft Technical Regulation on the requirements for vehicle oils [4].

The first draft was developed taking into account the requirements of Regulation CLP (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on the classification, labelling and packaging of chemicals and mixtures, Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste (Waste Framework Directive). However, regarding the requirements for lubricants, there are certain technical problems associated with the lack of an adequate methodology for assessing tribotechnical, physicochemical and rheological properties that meet international and European standards (ISO, ASTM, DIN) in terms of quality indicators in real operating conditions.

From the point of view of energy efficiency and national security, at strategic enterprises of the oil and gas, thermal power and aerospace complexes, in the production of high-speed transport, agricultural and military hybrid equipment, predicting the lubrication efficiency and wear resistance of friction pairs, especially for friction units operating under extreme conditions, is a necessary direction to improve reliability and extend the service life in a wide range of changes in contact loads, speeds, temperatures, impact of lubricant.

Setting the task.

For operating conditions, an important factor is the extreme friction conditions, which are proposed to be investigated using contact-mechanical, rheological and physicochemical aspects for a wide range of assemblies: non-conformal friction units with a changed actual form of local contact (units with point friction contact, which are typical for various bearing friction units and units with linear friction contact, which are typical for gears and some parts of an internal combustion engine); conformal friction units (having a complete contact of surfaces under sliding friction conditions, for example, between the upper compression ring and the inner wall of the cylinder liner of an internal combustion engine).

The corresponding extreme friction conditions (i.e., in real operating conditions) for non-conformal and conformal assemblies will occur in case of insufficient lubrication (lubrication starvation), when the lubricant does not regularly enter the contact zone due to several reasons: 1) non-stationary friction conditions in the «stop-and-go» mode; 2) loss of mechanical stability of the lubricant due to the manifestation of non-Newtonian properties at high shear rates under low-temperature start-up conditions (rheological aspect); 3) insufficient structural adaptability of the modified layers under conditions of boundary friction at high loads in the contact zone (physicochemical aspect).

The characteristic friction conditions lead to the generation of contact stresses in the subsurface contact zone, especially for assemblies with a point and linear contact form. The corresponding stresses will cause deformation processes as a result of repeated microplastic shear in the zone of discrete contact areas along the tops of friction surface micro-irregularities, which generally characterize the stress-strain state of friction contact surfaces (contact-mechanical aspect).

Thus, increasing the lubrication efficiency and wear resistance of friction units under extreme friction conditions should be considered from the point of view of preventing contact fracture to prevent crumbling (pitting) for bearing friction units as a result of repeated microplastic shear and to counteract scoring for internal combustion engine units in the zone of discrete contact areas along the tops of the micro-irregularities.

For internal combustion engine components, extreme operating conditions are significantly related to unsteady friction conditions and the temperature factor of the local contact zone, especially for low-temperature starting conditions. Unsteady-state operating conditions with frequent start-stops during low-temperature starting of an internal combustion engine often lead to insufficient lubrication (lubrication starvation) in the contact zone due to the following reasons: firstly, there is not enough lubricant in the contact zone to form a lubricant layer of optimal thickness, secondly, due to non-Newtonian behavior, the lubricant layers do not have time to relax and acquire a stable structural viscosity (rheological aspect) and thirdly, to have the necessary structural adaptability of the newly formed modified layers during engine warm-up after a low-temperature start (physicochemical aspect), which ultimately leads to the appearance of scoring in the area of discrete areas of frictional contact along the tops of micro-irregularities of friction surfaces (contact-mechanical aspect).

For extreme conditions of operation of conformal friction units of an internal combustion engine under sliding friction, an important factor is the temperature factor, namely, it is important to compare the average local temperature in the friction contact zone and the critical local temperature, which will characterize the

thermomechanical stability under conditions of plastic-deformed contact in the boundary lubrication mode, which may occur, for example, in the zone of the upper dead center along the stroke of the internal combustion engine piston. Determination of the average local temperature is achieved by correlating the temperature of the oil volume temperature and the local temperature in the friction contact zone. The excess of the average temperature in the contact zone over the critical temperature gives the necessary grounds for modifying the qualitative and quantitative physicochemical composition of lubricants order to increase thermomechanical stability to ensure the structural adaptability of the newly formed modified layers to extreme friction conditions.

The necessary information about the nature of many phenomena in lubrication can be obtained only by applying a fundamentally new and modern approach to the effective creation (modification) of a lubricant for specific operating conditions and lubrication mode, establishing the optimal range of operation of friction units for modified lubricants. This is achieved by choosing an effective concept for conducting comprehensive experimental (qualification) tests, using the necessary modern and automated equipment, applying modern methods of mathematical processing of research results and implementing the results of experimental studies during bench and operational (field) tests on original equipment and machines at lubricant manufacturers and friction unit operators.

As part of this work, we propose a modern scientific and applied approach to the comprehensive evaluation of lubricants and the introduction of a new concept of comprehensive tests to improve the lubrication efficiency and wear resistance of friction pairs, which maximally approximate the conditions of qualification (experimental) studies to the real friction conditions of vehicle components in operation.

Presentation of the main material.

In Figure 1 schematically presents the proposed general concept of comprehensive testing of lubricants to improve the lubrication efficiency and wear resistance of conformal and non-conformal components (friction bearing units and internal combustion engine components) operating under extreme operating conditions, covering the full life cycle of the lubricant from the manufacture of mixtures, to the development and implementation of modified oils and to the end of the life of the used oil at operating enterprises. If the results of bench or operational tests do not show the expected positive results, the input physical and chemical parameters of the lubricants are adjusted, and all qualification tests and data processing are repeated until positive results are obtained in operational tests.

The corresponding concept provides a scheme of complex experimental and calculation studies of the mechanical properties of friction contact, contact shape, physical (rheological) properties of lubricants, thickness of the modified layer, qualitative and quantitative chemical composition of active components in the lubricants, structural adaptability and wear characteristics of the modified layers.

According to Fig. 1:

Block A – substantiation and establishment of input parameters of the physical and chemical composition of lubricating media for friction bearing units and internal combustion engine units;

Block B – justification and establishment of output parameters of the physical and chemical composition of lubricants for friction bearing units and internal combustion engine units;

Block C – processing the results of experimental and computational studies to build mathematical models for assessing the stress-strain state of the friction contact, the thickness of the lubricant layer and the wear rate of friction pairs, taking into account the shape of the contact, mechanical properties of materials, rheological properties (type) of lubricants and local temperatures in the friction contact zone of friction bearing assemblies and ICE units;

Block D – introduction of modified oils for friction bearings and internal combustion engine units;

Block E – bench and operational testing of modified oils for friction bearing units and internal combustion engine units at operating companies.

Establishing the relationship between external influences on a tribotechnical system and changes occurring in the friction contact zone is the main goal of experimental research. Expanding the range of load, speed and temperature parameters for specific operating conditions requires the development of comprehensive universal methods and express methods for assessing the performance of a friction unit in relation to various operating conditions.

Means of implementing a modern concept.

1. Stand for optical interferometric studies of the actual contact shape and lubricant layer thickness for bearing assemblies friction in the contact-mechanical aspect.

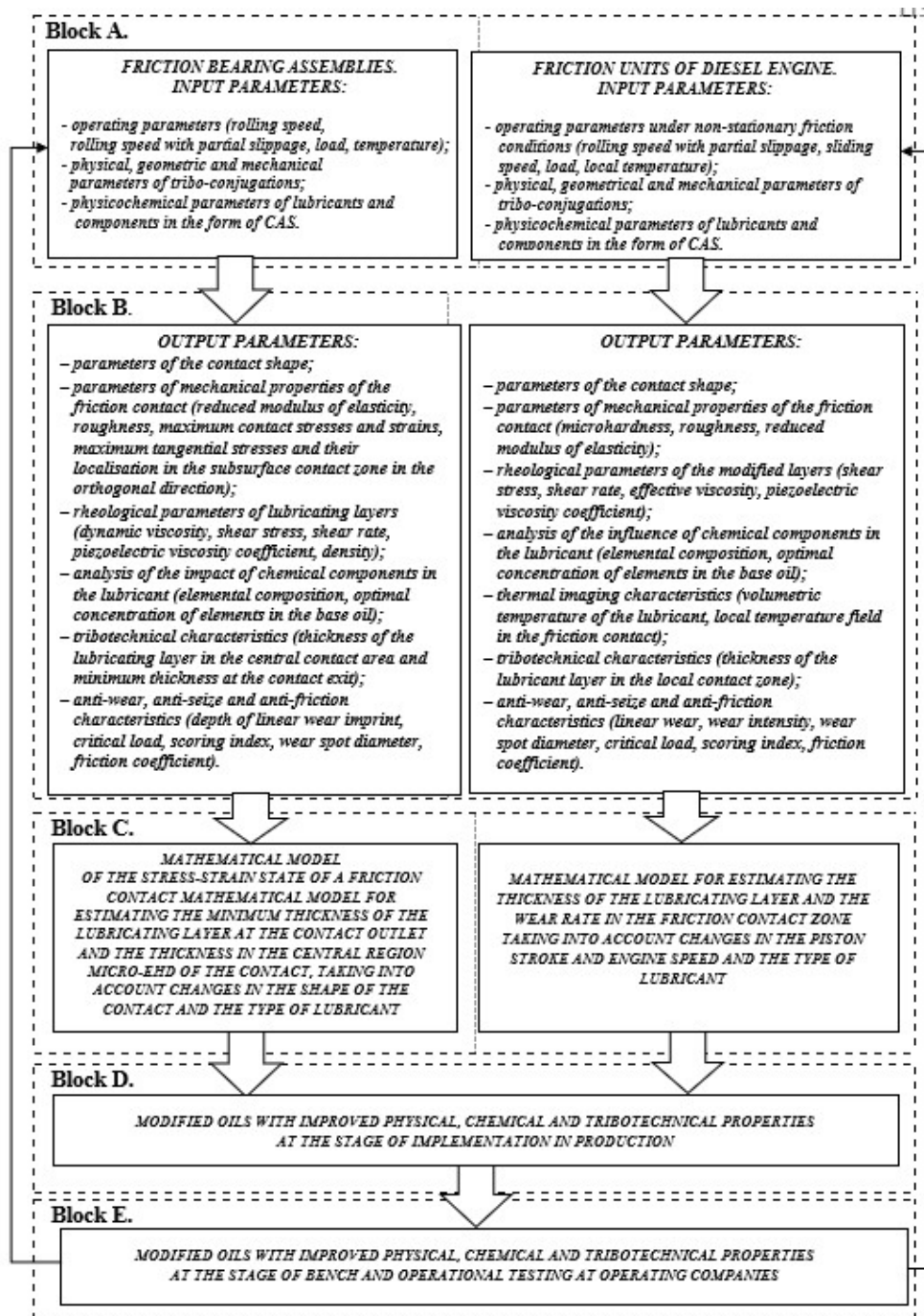


Figure 1 – The general concept of comprehensive testing of lubricants to improve lubrication efficiency and wear resistance of friction units in operation

In order to conduct experimental studies of micro-EHD lubrication in friction bearings, a stand can be used to measure the actual contact shape and thickness of the lubricant layer by optical interferometry, taking into account the pattern of lubricant supply and distribution using photo and video recording equipment.

The methodology for conducting optical interferometric studies and calibrating the necessary parameters to determine the actual thickness of the lubricating layer is described in detail in monograph [5].

The general view and schematic diagram of the stand simulating conditions similar to those that occur on the surfaces in point contacts of various friction bearing assemblies (radial, thrust, angular contact ball bearings with an outer ring or plate, tubular roller bearings, etc.) are shown in Fig. 2.

The tribotechnical contacting pair of indenter with counterbody is: steel ball – glass disc for circular contact (Fig. 3, *a*); steel ball – glass ring for elliptical contact (Fig. 3, *b*).

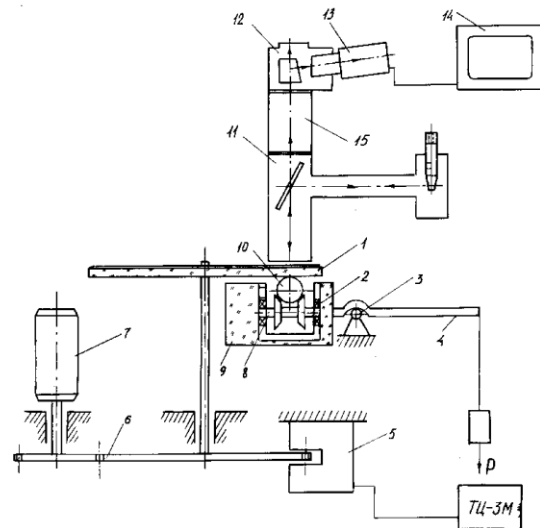


Figure 2 – General view and schematic diagram optical interferometric research stand



a



b

Figure 3, *a, b* – The contacting tribopair of the indenter and the counterbody in point contact:
a – circular contact ($\beta = 1$); *b* – elliptical contact ($\beta = 8$)

The bench thus allows for the study of the actual contact shape and lubricant layer thickness for the circular friction contact, which is typical for thrust ball bearings with self-aligning outer plates, and for the elliptical friction contact, which is typical for a wide range of ball and some roller bearings with an outer ring.

2. Evaluation of lubricating media from the rheological point of view for friction bearing units.

The main rheological characteristic of a lubricant is its dynamic viscosity (η), which is a measure of resistance to fluid flow or deformation. The dynamic viscosity of an oil (η) at temperature (t) is calculated based on the kinematic viscosity using the formula:

$$\eta = \nu \cdot \rho, \quad (1)$$

where ν – the kinematic viscosity, mm^2/s .

ρ – the density of the oil at the same temperature at which the kinematic viscosity ν was determined, g/cm^3 .

From the point of view of the rheological characteristic (viscosity-pressure-temperature relationship) of the oils under study, a more universal definition of dynamic viscosity should be used, which is equally suitable for Newtonian and non-Newtonian oils. For this purpose, the dynamic viscosity is defined as the ratio of the shear stress (τ) to the shear rate gradient ($\dot{\gamma}$):

$$\eta_0 = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

The dynamic viscosity (η_0) at atmospheric pressure and temperature at the contact inlet at high shear rate gradients is measured by a rotational viscometer (Fig. 4) using a coaxial-cylindrical measuring device (Fig. 5).



Figure 4 – General view of the rotational viscometer REOTEST 2.1

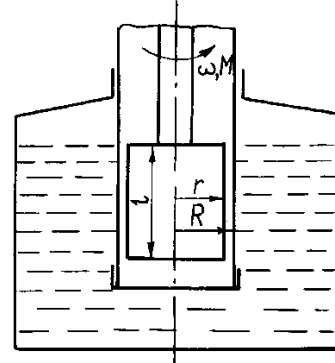


Figure 5 – Diagram of the coaxial-cylindrical system REOTEST 2.1

When determining dynamic viscosity, rotational viscometers have the advantage of measuring viscosity as a function of time at high shear rate gradients of up to $5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ and determining the presence of elastic- viscosity hysteresis.

The shear stress (τ) and velocity gradient (γ) are determined according to the following relations:

Shear stress (τ)

$$\tau = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot r^2}; \quad (3)$$

Shear rate gradient (γ):

$$\gamma = \frac{2 \cdot \omega \cdot R^2}{R^2 - r^2}; \quad (4)$$

3. A set of qualification tests to determine the tribotechnical properties of lubricants with different qualitative and quantitative chemical composition.

To carry out comprehensive experimental studies to establish the qualitative and quantitative chemical composition of lubricants and their effectiveness in terms of tribotechnical properties, it is proposed to conduct two-stage tests: at the first stage – rapid analysis of elemental chemical composition and concentration in the form of additives (friction modifiers, nanomodifiers) in a neutral base oil using an energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer (EDXRFS) according to the European standard ASTM D7751 [6]; at the second stage – simultaneous assessment of anti-wear and antifriction properties using a tribometer from the Swiss company CSM Instruments according to the European standard ASTM G99 [7] with a high degree of accuracy of the results obtained according to the scheme shown in Fig. 6.

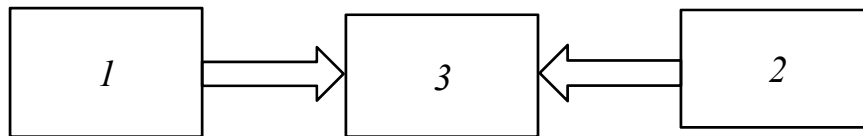


Figure 6 – Block diagram of complex two-stage experimental studies:
1 – USRFS; 2 – Tribometer; 3 – Unified software of the USFS and tribometer for PC

The EDXRFS spectrometer (Fig. 7) allows achieving the necessary flexibility and versatility in setting up the procedure for calculating the concentrations of elements in the range from sodium (atomic number 11) to uranium (atomic number 92) to record spectra for accurate assessment of the chemical composition of lubricants and the concentration of coolant components within 10 seconds.

With a resolution of up to 200 eV, the spectrometer enables you to identify chemical components and determine the optimum concentration with high accuracy thanks to its 4096-channel analogue-to-digital converter.

The spectrometer includes special software that allows you to build spectral lines of elemental composition and concentration in percent or *ppm* of the studied components of the CAS in lubricants.

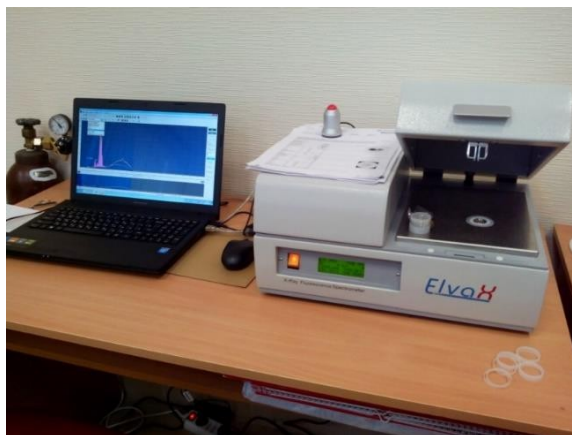


Figure 7 – General view of the spectrometer (EDRFS) and a PC with the appropriate software interface

To determine the effectiveness of the qualitative and quantitative composition of chemical components, it is advisable to simultaneously conduct tribotechnical studies to assess anti-wear and antifriction properties using a tribometer with a high degree of accuracy of the results obtained. Below is a general view of the tribometer and a schematic diagram of the test (Fig. 8).

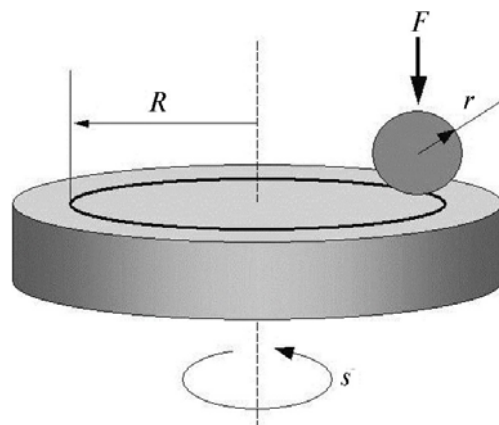
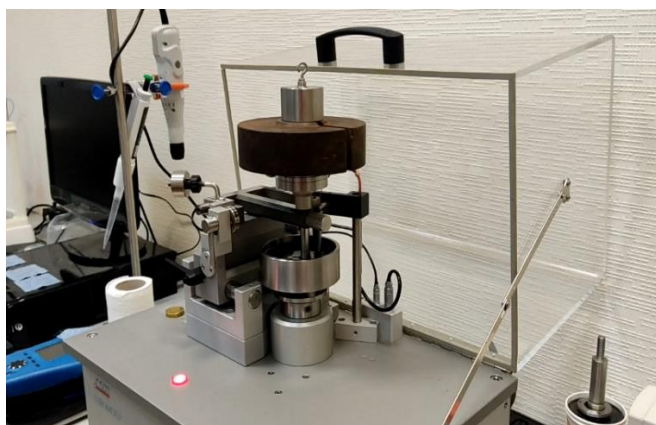


Figure 8 – General view of the tribometer with the corresponding PC and the test scheme

The principle of measuring the formation of a modified layer (if the value is above 0) or linear wear (if the value is below 0) and the friction force on the tribometer allows you to determine the thickness of the modified layer or the depth of the linear wear imprint H [nm] (anti-wear properties) of the counter body (ball) and the friction coefficient μ (antifriction properties) by the minimum deviation of the elastic lever in the vertical and horizontal directions, respectively, in real time (run), taking into account temperature changes, contact pressure, speed, moisture, and thus determine the optimal concentration of chemical components in the lubricant medium for improved anti-wear and antifriction properties.

4. Methodological support for testing of internal combustion engine components under non-stationary friction conditions.

The main principle of choosing a scheme for tribotechnical and rheological tests under non-stationary friction conditions is the maximum approximation to the actual operating conditions of the studied tribological couplings. To do this, it is necessary to ensure that the nature of the specimen movement, sliding values and speeds, as well as the materials of the friction pairs, which simulate the conditions of friction units in the so- called start-stop or stop-end-go modes, are consistent. When choosing a schematic diagram for studying the processes of friction and wear of moving joints in lubricants, it is necessary to take into

account the obtaining of a qualitative picture on the samples observed when implementing the conditions of intensive friction and wear in the parts of the cylinder-piston group of an internal combustion engine, namely when contacting the compression ring – the inner wall of the working cylinder with full contact of the contact surfaces under sliding friction (conformal units) or with a local contact zone under rolling friction with partial slippage (non-conformal units), where the relevant studies can be attributed to units with linear friction contacts operating in an internal combustion engine (for example, timing cams).

The selected research scheme (Figure. 9) allows taking into account such friction processes as the interaction of tribotechnical pair materials in the lubricant, changes in the contact shape, rheological changes in the lubricant, changes in the qualitative and quantitative chemical composition of components in the lubricant, and wear of moving joints in an automated mode on the universal automated friction test UAFT bench.

A block diagram and general view of the UAFT is shown in Fig. 9 i 10.

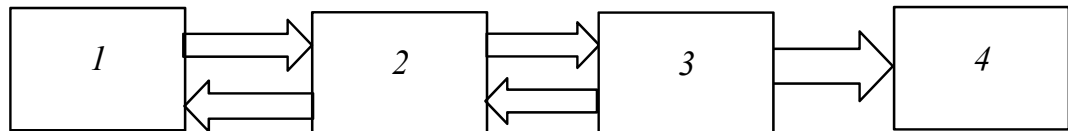


Figure 9 – Block diagram of the UAFT:

1 – Friction machine SMC-2; 2 – 4: Automated control unit with software (ACUS), which includes:
2 – Strain gauge unit; 3 – Analogue-to-digital converter (ADC); 4 – PC software



Figure 10 – General view of the UAFT

To investigate the relationship between the volumetric temperature of the oil under study, measured by a thermocouple, and the local temperature in the local contact zone, a thermal imaging method is used to measure the local temperature field under different modes of loading in the contact.

The thermal imaging method allows us to study the change in local temperatures of friction units in the contact zone and outside the contact zone using a modern portable thermal imager TESTO-875-2i at UAFT (Fig. 11).



Figure 11 – General view of the TESTO-875-2i portable thermal imager for UAFT

Conclusion.

A modern concept of comprehensive tests to improve the efficiency of lubrication and wear resistance of friction units operating under extreme friction conditions (in service) is proposed on the basis of comprehensive computational and experimental studies on contact mechanical, rheological, and physicochemical aspects.

The means of implementing complex tests that take into account: non-stationary friction conditions, the shape of the actual contact and friction kinematics, rheological properties of lubricating (modified) layers, local temperature in the friction contact zone, physical and chemical composition of components in the lubricant are determined.

REFERENCES

1. Myshkin M.K. Friction, lubrication, wear: Physical foundations and engineering applications of tribology / M.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. – Fizmat. – 2007. – 370 p.
2. Fuchs I.G. Introduction to tribology / I. G. Fuchs, I.A. Buyanovsky. – Oil and gas, 1985. – 278 p.
3. Yevdokimov Yu.A. Planning and analysis of experiments on solving friction and wear problems / Yu. A. Yevdokimov, V.I. Kolesnikov, A.I. Teterin. – Naukova Dumka, 1980. – 227 p.
4. Order of the Ministry of Energy of Ukraine No. 331 dated 09/29/2022 in accordance with subparagraph 3 of paragraph 6 of the Regulation on the Ministry of Energy of Ukraine, approved by the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 06/17/2020 No. 507.
5. Dmitrichenko M.F. Lubricating effect of oils under elastohydrodynamic lubrication conditions: monograph / M.F. Dmitrichenko, O.A. Milanenko. – Kyiv: Ukravtodor, 2009 – 184 p.
6. ASTM D7751-16: Standard Test Method for Determination of Additive Elements in Lubricating Oils by EDXRF Analysis.
7. ASTM G99-17: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мишкін М.К. Тертя, змащення, зношування: Фізичні основи та інженерні застосування трибології / М.К. Мишкін, М.І. Петроковець. – Фізмат. – 2007. – 370 с.
2. Фукс І.Г. Вступ до трибології / І. Г. Фукс, І.А. Буяновський. – Нафта і газ, 1985. – 278 с.
3. Євдокимов Ю.А. Планування та аналіз експериментів з вирішення задач тертя та зношування / Ю.А. Євдокимов, В.І. Колесников, А.І. Тетерін. – Наукова думка, 1980. – 227 с.
4. Наказ Міністерства Енергетики України від 29.09.2022 № 331 відповідно до підпункту 3 пункту 6 Положення про Міністерство Енергетики України, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17.06.2020 № 507.
5. Дмитриченко М.Ф. Мазильна дія оливи в умовах еластогідродинамічного мащення: монографія / М.Ф. Дмитриченко, О.А. Міланенко. – К.: Укравтодор, 2009 – 184 с.
6. ASTM D7751-16: Стандартний метод випробування для визначення елементів присадок у мазильних оливах за допомогою аналізу EDXRF.
7. ASTM G99-17: Стандартний метод випробування на знос за допомогою пристрою Pin-on-Disk.

ABSTRACT

Dmytrychenko M.F., Milanenko O.A., Bilyakovich O.N., Bobro A.M. Modern approach to conducting comprehensive tests of lubricants for friction units operating under operating conditions. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article is devoted to the proposed modern scientific and applied approach to the comprehensive assessment of lubricants and the introduction of a new concept of comprehensive tests to improve the efficiency of lubrication and wear resistance of friction pairs, which maximally approximate the conditions of qualification (experimental) studies to the real friction conditions of vehicle components in operation. This is achieved by choosing an effective concept for conducting comprehensive experimental (qualification) tests, using the necessary modern and automated equipment, applying modern methods of mathematical processing of research results and implementing the results of experimental studies during bench and operational (field) tests on original equipment and machines at enterprises producing lubricants and operators of friction units.

The means of implementing complex tests that consider: non-stationary friction conditions, the shape of the actual contact and friction kinematics, rheological properties of lubricating (modified) layers, local temperature in the friction contact zone, physical and chemical composition of components in the lubricant in terms of contact-mechanical, rheological and physical and chemical aspects are determined.

Thus, the general concept of comprehensive testing of lubricants to improve the lubrication efficiency and wear resistance of conformal and non-conformal units (friction bearing units and internal combustion engine units) operating under extreme operating conditions is presented, covering the full life cycle of the lubricant medium from the manufacture of mixtures, to the development and implementation of modified oils and to the final service life of used oil at operating enterprises. Relevant results of bench or operational tests, if they did not show the expected positive results, make it possible to adjust the input physical and chemical parameters of lubricants in accordance with the proposed concept scheme and achieve positive results of operational tests.

KEYWORDS: EXTREME FRICTION CONDITIONS, LUBRICANT, BEARING FRICTION UNIT, INTERNAL COMBUSTION ENGINE (ICE) UNITS, NON-CONFORMAL FRICTION UNITS, CONFORMAL FRICTION UNITS, MICROELASTOHYDRODYNAMIC (MICRO-EGD) LUBRICATION, LUBRICATING (MODIFIED) LAYER, CHEMICAL ACTIVE SUBSTANCES (CAS), STRESS-STRAIN STATE OF CONTACT FRICTION SURFACES, RHEOLOGICAL PROPERTIES OF LUBRICANTS, QUALITATIVE AND QUANTITATIVE PHYSICAL AND CHEMICAL COMPOSITION OF LUBRICANTS, FRICTIONAL CONTACT.

РЕФЕРАТ

Дмитриченко М.Ф. Сучасний підхід щодо проведення комплексних випробувань мастильних матеріалів для вузлів тертя, що працюють в умовах експлуатації / М.Ф. Дмитриченко, О.А. Міланенко, О.М. Білякович, А.М. Бобро // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Стаття присвячена запропонованому сучасному науково-прикладному підходу щодо комплексної оцінки мастильних матеріалів та впровадження нової концепції комплексних випробувань для підвищення ефективності мащення і зносостійкості пар тертя, які максимально наближають умови кваліфікаційних (експериментальних) досліджень до реальних умов тертя вузлів транспортних засобів, що працюють в експлуатації. Це досягається вибором ефективної концепції проведення комплексних експериментальних (кваліфікаційних) випробувань, використання необхідного сучасного і автоматизованого обладнання, застосування сучасних методів математичної обробки результатів досліджень і впровадження результатів експериментальних досліджень при проведенні стендових і експлуатаційних (натурних) випробувань на оригінальному обладнанні та машинах на підприємствах-виробників мастильних матеріалів та експлуатантів вузлів тертя.

Визначені засоби реалізації комплексних випробувань, що враховують: нестаціонарні умови тертя, форму фактичного контакту та кінематику тертя, реологічні властивості мастильних (модифікованих) шарів, локальну температуру в зоні фрикційного контакту, фізико-хімічний склад компонентів в мастильному матеріалі за контактнo-механічними, реологічними та фізико-хімічними аспектами.

Таким чином, представлена загальна концепція комплексних випробувань мастильних матеріалів щодо підвищення ефективності мащення та зносостійкості конформних і неконформних вузлів (підшипникових вузлів тертя та вузлів ДВЗ), які працюють в екстремальних умовах роботи, охоплює повний життєвий цикл функціонування мастильного середовища від виготовлення сумішей, до розробки і впровадження модифікованих оливи і до кінцевого терміну експлуатації відпрацьованої оливи на підприємствах-експлуатантах. Відповідні результати стендових або експлуатаційних випробувань, якщо вони не показали очікуваних позитивних результатів, надає можливість скорегувати вхідні фізико-хімічні параметри мастильних середовищ згідно запропонованої схеми концепції, і досягати позитивних результатів експлуатаційних випробувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕКСТРЕМАЛЬНІ УМОВИ ТЕРТЯ, МАСТИЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ, ПІДШИПНИКОВИЙ ВУЗОЛ ТЕРТЯ, ВУЗЛИ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ (ДВЗ), НЕКОНФОРМНІ ВУЗЛИ ТЕРТЯ, КОНФОРМНІ ВУЗЛИ ТЕРТЯ, МІКРОЕЛАСТОГІДРОДИНАМІЧНЕ (МІКРО-ЕГД) МАЩЕННЯ, МАСТИЛЬНИЙ

(МОДИФІКОВАНИЙ) ШАР, ХІМІЧНО-АКТИВНІ РЕЧОВИНИ (ХАР), НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ, РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЯКІСНИЙ ТА КІЛЬКІСНИЙ ФІЗИКО-ХІМІЧНИЙ СКЛАД МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ, ФРИКЦІЙНИЙ КОНТАКТ.

AUTHORS:

Dmytrychenko Nikolay F., Ph.D., Engineering (Dr.), National Transport University, professor department of Manufacturing repair and materialoved, e-mail: dmitrichenko@ntu.edu.ua, tel. (044)2808203, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovich Pavlenko str. 1, of. 318, orcid.org/0000-0003-4223-1838.

Milanenko Oleksandr A., Dr. Sc. (Eng.), National Transport University, associate Professor of Department of Manufacturing, Repair and Materials Science, e-mail: milanmasla@gmail.com, tel. (044)2801886, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovicha-Pavlenko str., of. 102, orcid.org/0000-0002-8197-5277.

Bilyakovych Oleg N., associate professor, State non-commercial company State university «Kyiv aviation institute», associate professor department of technologies of air-ports, e-mail: oleg65@voliacable.com, tel. (044)4067694, Ukraine, 03680, Kyiv, b. Cosmonaut of Komarova, 1, of. 1.409, orcid.org/0000-0002-2423-2346.

Bobro Andrii M., postgraduate, National Transport University, assistant of Department of Manufacturing, Repair and Materials Science, e-mail: stormshadow0117@gmail.com, tel. (044)2801886, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovicha-Pavlenko str., of. 102, orcid.org/0009-0002-1193-117X.

АВТОРИ:

Дмитриченко Микола Федорович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство», e-mail: dmitrichenko@ntu.edu.ua, тел. (044)2808203, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 318, orcid.org/0000-0003-4223-1838.

Міланенко Олександр Анатолійович, доктор технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство», e-mail: milanmasla@gmail.com, тел. (044) 2801886, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к.102, orcid.org/0000-0002-8197-5277.

Білякович Олег Миколайович, кандидат технічних наук, професор, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», професор кафедри «Технологій аеропортів», e-mail: oleg65@voliacable.com, тел. (044)4067694, Україна, 03680, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, к.1.409, orcid.org/0000-0002-2423-2346.

Бобро Андрій Михайлович, аспірант, Національний транспортний університет, асистент кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство», e-mail: stormshadow0117@gmail.com, тел. (044) 2801886, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка,1, к.102, orcid.org/0009-0002-1193-117X.

REVIEWERS:

Gutarevich Y.F. Engineering (Dr.), State non-commercial company State university «Kyiv aviation institute», professor department of motors and heating, Kyiv, Ukraine.

Tamargazin A.A., doctor of technical sciences, professor, head of the airport technology department of the faculty of aircraft of the State non-commercial company State university «Kyiv aviation institute».

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гутаревич Ю.Ф, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри двигунів і теплотехніки, Київ, Україна.

Тамаргазін О.А., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій аеропортів факультету літальних апаратів Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут».

МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Добровольський О.С., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, dobrovolskiy@ukr.net, orcid.org/0000-0003-0048-1388

Більчук К.О., Національний транспортний університет, Київ, Україна, bilchuk@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4369-2070

METHODS OF ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF VEHICLES

Dobrovolskyi O.S., Ph.D in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, dobrovolskiy@ukr.net, orcid.org/0000-0003-0048-1388

Bilchuk K.O., National Transport University, Kyiv, Ukraine, bilchuk@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4369-2070

Постановка проблеми.

Транспортні засоби є важливою складовою інфраструктури, що забезпечує ефективне перевезення вантажів та пасажирів на значні відстані як у міжнародному сполученні так і всередині країни. Однак експлуатація таких транспортних засобів пов'язана з підвищеними ризиками, адже їх несправність може призвести до серйозних дорожньо-транспортних пригод та значних матеріальних збитків.

Технічний стан транспортних засобів є одним з найважливіших факторів, що впливають на безпеку дорожнього руху та ефективність їх експлуатації. Об'єктивна оцінка технічного стану та відповідне технічне обслуговування покликані вирішити ключову проблему – забезпечення безпеки та ефективності шляхом збереження технічного стану. Зростання обсягів вантажних перевезень, збільшення експлуатаційних навантажень та жорсткі вимоги до безпеки дорожнього руху роблять питання оцінки технічного стану транспортних засобів все більш актуальним.

Ефективність експлуатації транспортних засобів, яка визначається сучасними вимогами до екологічної безпеки та безпеки дорожнього руху у значній мірі визначається технічним станом їх двигунів внутрішнього згорання та агрегатів транспортного засобу. Для впливу на технічний стан двигуна та транспортного засобу в цілому, необхідна об'єктивна інформація, яка забезпечується технічним діагностуванням на базі різноманітних методів та технічних засобів. Проведений аналіз методів, способів та засобів діагностування транспортних засобів показав їх велику різноманітність, складність при реалізації в умовах експлуатації. А умови експлуатації транспортного засобу визначають необхідність вибору методу діагностування, який би забезпечував із заданою точністю технічний стан двигуна внутрішнього згорання безпосередньо на транспортному засобі за допомогою автономних та не складних засобів технічного діагностування без застосування складних навантажувальних стендів.

Для виявлення причин несправності транспортного засобу, одним із варіантів може стати застосування дистанційної діагностики транспортних засобів, а саме системи моніторингу транспортного засобу, яка дає змогу віддалено визначати та контролювати несправності транспортного засобу в режимі реального часу. Така система може забезпечити незалежну діагностику транспортного засобу без фізичної присутності на місці фахівця. За необхідності фахівець може віддалено отримати уявлення про стан транспортного засобу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Вдосконаленням наявних систем моніторингу процесів експлуатації транспортних засобів, присвячені роботи науковців, Матейчика В.П. [1, 2], Волкова В.П. [3, 4], Грицука І.В. [5, 6], Худякова І.В. [7, 8], Голованя А.І. [9, 10] та інших науковців.

В роботі [3] розглянуті сучасні системи моніторингу транспортних засобів, але не розглянуто вибір і систематизація схем їх застосування. В роботі [4] розглянуті питання застосуванню інформаційних комплексів моніторингу на транспорті. Але, потребують подальшого розвитку питання поєднання засобів і технологій у відповідні схеми апаратного забезпечення систем моніторингу експлуатації транспортних засобів. В роботі [5] висвітлені питання особливостей дистанційної ідентифікації режимів роботи водія в інформаційній системі моніторингу транспортного засобу. Але подальшого розвитку потребують питання систематизації підходів до

процесів моніторингу в межах системних комплексів спостереження і урахування їх складових на основі функціоналу. В роботах [7, 8] розглянуті системи моніторингу засобів транспорту і операторів. Показані сучасні перспективи їх застосування. Однак подальшого розвитку потребують питання систематизації схем і обґрунтування конфігурацій засобів моніторингу в умовах експлуатації транспортних засобів.

Результати аналізу публікацій свідчать, що й нині актуальним залишається питання вдосконалення методів оцінки існуючих систем моніторингу технічного стану транспортних засобів.

Мета і завдання дослідження.

Метою дослідження є проведення аналізу методів оцінки технічного стану транспортних засобів за допомогою існуючих систем моніторингу процесів експлуатації транспортних засобів.

Виклад основного матеріалу.

Найбільш поширеним і доступним видом транспорту в Україні є автомобільний транспорт, який широко використовується для міських, приміських, міжміських, внутрирайонних, внутриобластних, міжобласних та міжнародних перевезень вантажів і пасажирів. За обсягом перевезень вантажів та пасажирів протягом багатьох років він обіймає перше місце [11].

Таку позицію автомобільний транспорт займає завдяки високій мобільності та великій різноманітності транспортних засобів за вантажопід'ємністю, призначеністю, конструктивними й техніко-економічними характеристиками. Завдяки цьому він може забезпечити перевезення вантажів різних за виглядом, характером, обсягом і величиною партії, забезпечуючи високу якість їхньої доставки безпосередньо від постачальника до замовника.

Якість роботи автомобільного транспорту значною мірою впливає на безперебійність торгівлі, собівартість продукції, розмір товарних запасів і рентабельність підприємств, задоволення попиту населення в пасажироперевезеннях, а споживачів у товарах.

Для покращання роботи автомобільного транспорту розвивається матеріально технічна база, за рахунок оновлення автомобільного парку, збільшується частка сучасних транспортних засобів з поліпшеними технічними і експлуатаційними характеристиками, надійністю та довговічністю. Завдяки кращим показникам паливної економічності збільшується і частка транспортних засобів що відповідають сучасним європейським нормам.

Основним засобом забезпечення постійної високої технічної готовності транспортного засобу є своєчасне проведення з високою якістю технічного обслуговування або ремонту.

Так, технічне обслуговування визначає комплекс операцій чи операції щодо підтримки роботоздатності або справності виробу під час використання за призначенням, зберігання та транспортування, а ремонт – комплекс операцій щодо відновлення справності або роботоздатності виробів та відновлення ресурсів виробів чи їх складових частин [12].

Невід'ємною частиною технічного обслуговування та ремонту є діагностування, яке разом з прогнозуванням залишкового ресурсу є одним з найважливіших умов підвищення ефективності, економічності та надійності використання транспортних засобів.

Основою технічного обслуговування рухомого складу на станціях технічного обслуговування є застосування і використання таких методів та підходів до обслуговування, які б були направлені на підвищення ефективності використання автомобілів, на зниження витрат і простоїв при технічному обслуговуванні та ремонті. Більшість з них ґрунтується на методах теорії надійності машин, і відповідно, носить ймовірнісний характер.

Для певної сукупності транспортних засобів, об'єднаних однаковими умовами експлуатації, методи теорії надійності дозволяють з достатньою ефективністю визначати необхідність у технічному обслуговуванні, ремонті, запасних частинах і прогнозувати залишковий ресурс. Однак, щодо конкретного транспортного засобу, чи його агрегатів, або при особливих умовах експлуатації, вони не дозволяють прийняти оптимальне рішення. У цьому випадку вирішити питання щодо встановлення реального технічного стану та об'ємів необхідних технічних дій можливо здійснити за допомогою технічного діагностування.

Більшість сучасних автомобілів мають вбудовану бортову систему діагностування, яка за допомогою датчиків сліdkує за справністю двигуна та його окремих систем. В конструкціях таких систем передбачено наявність спеціального діагностичного роз'єму для під'єднання комп'ютерних діагностичних приладів. Ці прилади дозволяють зробити комплексну функціональну діагностику автомобіля на діагностичній станції. При цьому значно скорочується час діагностування та зростає його достовірність.

Двигуни з електронною системою керування мають функцію діагностування методом самодіагностування. Суть методу полягає у наявності вбудованої в електронну систему керування

двигуном функції самодіагностування, яка дозволяє, шляхом опитуванням пам'яті несправностей електронного блоку, швидко визначити несправний конструктивний елемент та зберігати код несправності у пам'яті блока. Перевагами цього методу є можливість визначення несправностей двигуна шляхом зчитування кодів похибок із пам'яті з мінімальними затратами часу та кількістю діагностичних операцій. Застосування цього методу в експлуатації ускладнюється відносно великою вартістю діагностичного обладнання та високими вимогами до кваліфікації персоналу, який в свою чергу, для правильної постановки діагнозу повинен дуже добре володіти традиційними методами діагностування.

У країнах з розвинутою автомобільною інфраструктурою все частіше використовують нові системи контролю та керування транспортом. Це досить складні системи, які впроваджуються не тільки на автомобільному транспорті, але й на транспорті в цілому в рамках єдиного телематичного середовища.

Телематичними, згідно зі спрощеним визначенням, вважають системи, які, працюють у розподіленому інформаційному й комунікаційному середовищі. Це загальне із транспортом середовище, яке використовуються телематичними системами для підвищення якості й ефективності транспорту.

Використання сучасних досягнень інформаційних технологій і засобів зв'язку – телематики – у керуванні транспортними системами дозволяє кардинально підвищити ефективність і якість їх роботи. Тому транспортні системи з використанням автоматизованих систем керування, побудованих на основі телематики, одержали в усьому світі спеціальне найменування – інтелектуальні транспортні системи (ITS). У сучасному світі формується єдина відкрита архітектура ITS: протоколи інформаційного обміну; форми перевізних документів; стандартизація параметрів, використовуваних технічних засобів зв'язку, контролю й керування; процедур керування тощо.

В цілому телематичні системи це такі, які складають в розвинених країнах основу досягнення їх загальнонаціонального ефекту; визначають сучасну культуру експлуатації автомобільного транспорту (АТ); ґрунтуються на оснащенні кожного транспортного засобу спеціальними гаджетами.

Комплекс технічних засобів для автоматизованого збору та обробки інформації про транспортний засіб (ТЗ) включає в себе наступні складові елементи:

- бортова система моніторингу технічного стану ТЗ;
- гаджет і система взаємодії гаджетів на ТЗ в ITS;
- віртуальне підприємство з експлуатації автомобільного транспорту, яке включає функцію автоматизованого збору і обробки інформації (моніторингу) про ТЗ.

На сучасному етапі розвитку автомобільного транспорту, найпоширенішими протоколами, що використовуються для реалізації дистанційної діагностики транспортних засобів є [13]:

1. OBD (On-Board Diagnostic) протокол, заснований на стандарті ISO 15031, що використовується для зчитування даних, що надсилаються до та з електричних систем або підсистем транспортного засобу.

2. UDS (Unified Diagnostics Service) протокол – міжнародний стандарт, який визначає, як повинні бути реалізовані послуги ISO 14229 через CAN. Мережа під час діагностичного сеансу складається із двох елементів – зчитувача, який надсилає запити та ECU, який перевіряється. Зв'язок між зазначеними елементами побудовано за принципом архітектури клієнт-сервер, де Клієнтом є зчитувач, а Сервером – ECU. Протокол передбачає, що Клієнт надсилає відповідний діагностичний запит, який передається одному або декільком цільовим Серверам. Після отримання діагностичного запиту Сервер генерує відповідну діагностичну відповідь та надсилає її клієнту.

3. DoIP (Diagnostics over Internet Protocol) протокол дозволяє використовувати UDS через TCP/IP в мережі Ethernet для доступу до послуг діагностики транспортного засобу. DoIP протокол забезпечує значно вищу швидкість передачі даних при мінімальних апаратних витратах у порівнянні з традиційною діагностикою на основі CAN. Тому DoIP є більш привабливим для сучасних автовиробників.

Для оцінювання спектра сучасних умов експлуатації транспорту та його технічного стану, визначення працездатності ТЗ і раціонального управління експлуатацією ТЗ з урахуванням дорожніх і експлуатаційних умов в оперативному режимі доцільно визначити, узагальнити наявні відомості, а також розробити механізм, що використовує інформаційний обмін в процесі дистанційного управління працездатністю транспортних засобів, що працюють в умовах ITS [3].

Для прикладу використання ITS, на рис. 1, представлена схема інформаційного обміну між елементами для здійснення дистанційного контролю, визначення і управління працездатністю й експлуатацією ТЗ, на прикладі віртуального підприємства, що містить транспортний засіб з двигуном

внутрішнього згорання, датчики, додаткові датчики для вимірювання різних параметрів ТЗ і ДВЗ, адаптер (сканер) OBD-II, контролер сканер-комунікатор (трекер), підключення до сполученого пристрою за допомогою *USB*, *Wi-Fi* або *Bluetooth*, бортовий інтелектуальний діагностичний комплекс (ІДК), *GPS*, *a-GPS*, *ГЛОНАСС*, *SBAS*, *GPRS*, *Internet* або локальну мережу, *Web-сервер*, базу даних, програмне забезпечення, інтелектуальний програмний, оперативну інформацію, отриману з (через) *Internet*, *GPS*, *ГЛОНАСС*, *SBAS* і (або) *GPRS*, учасників процесу комерційної експлуатації автотранспорту, автоматизоване робоче місце внутрішньої мережі.

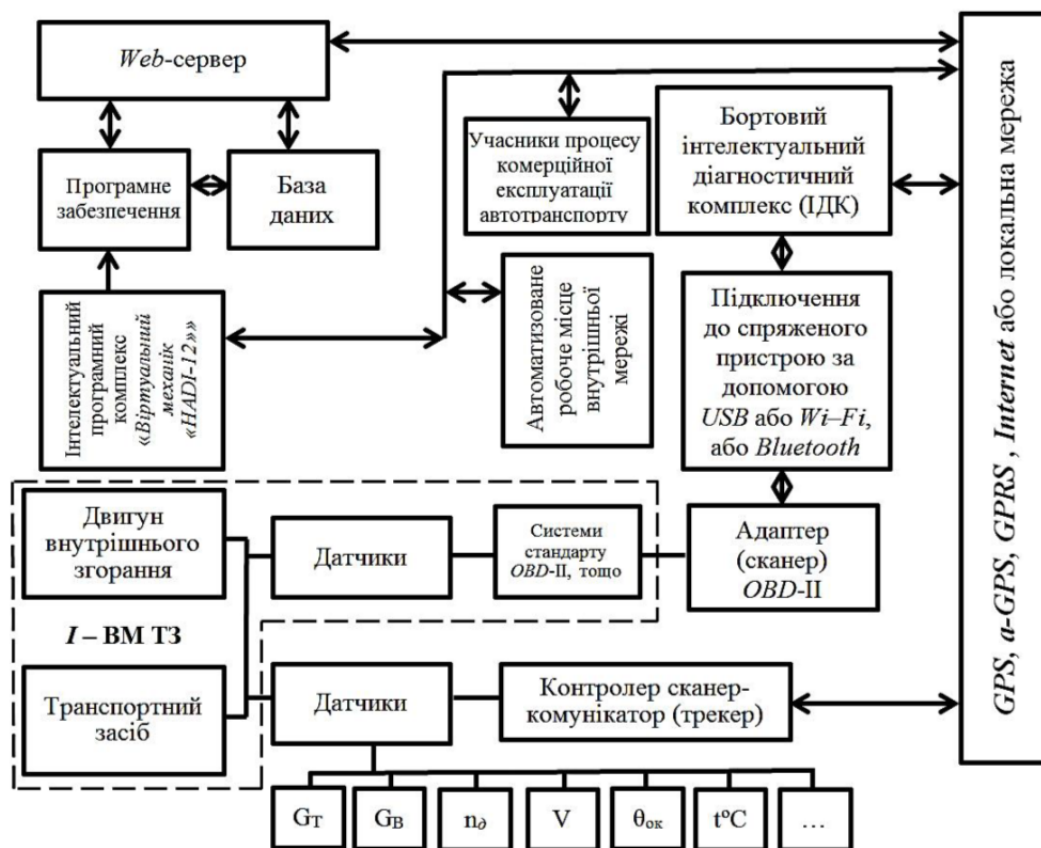


Рисунок 1 – Схема інформаційного обміну між елементами для здійснення дистанційного контролю, визначення і управління працездатністю та експлуатацією ТЗ [3]

Figure 1 – Diagram of information exchange between elements for remote control, determination and management of vehicle performance and operation [3]

Дана система дозволяє отримувати всі параметри роботи двигуна внутрішнього згорання та транспортного засобу в цілому, контролювати їх та приймати відповідні рішення по їх технічному стану та працездатності в дистанційному режимі.

Висновок.

Одним із основних методів визначення технічного стану транспортного засобу є – дистанційна діагностика, що наближається до того, щоб стати неминучим наступним етапом технічного розвитку автомобільної промисловості, та сприятиме зниженню витрат та обслуговування транспортних засобів.

Новітні можливості дистанційного діагностики перейти від планово-попереджувальної стратегії технічного обслуговування та ремонту до адаптивної з безперервним віддаленим контролем за технічним станом систем та агрегатів транспортного засобу, що дозволить:

- знизити ймовірність поломок, через можливі хибні помилки в його електронних блоках управління;
- зменшити часові витрати на проведення ремонту і технічного обслуговування транспортного засобу завдяки завчасного визначення несправності та підготовки сервісного центру до ремонту на момент прибуття транспортного засобу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Матейчик В.П., Навроцький А.В. Систематизація схем апаратного забезпечення систем моніторингу експлуатації транспортних засобів. Вісник приазовського державного технічного університету, Серія: Технічні науки, Вип. 48, 2024р. DOI: 10.31498/2225-6733.48.2024.310711, с. 184 – 192.
2. Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки: навч. посіб. / М. Ф. Дмитриченко, В. П. Матейчик, О. К. Гришук, М. П. Цюман // К.: НТУ, 2014. – 168.
3. Волков В.П., Матейчик В.П., Комов П.Б., Гришук І.В., Смешек М., Волкова Т.В., Цюман М.П. Інтелектуальні системи моніторингу транспорту: монографія, Харків: Вид-во НТМТ, 2015. – 246 с. ISBN 978-617-578-218-7.
4. Волков В.П., Матейчик В.П., Комов П.Б., Комов О.Б., Гришук І.В. Організація технічної експлуатації автомобілів в умовах формування інтелектуальних транспортних систем, Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Автомобіле-та тракторобудування №29, 2013, с.138-144
5. Гришук І.В., Матейчик В.П., Симоненко Р.В., Худяков І.В. Особливості дистанційної ідентифікації режимів роботи водія в інформаційній системі моніторингу транспортного засобу. Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr.19. Seria:Transport. – Rzeszow. – 2019. – С. 7-15.
6. Gritsuk, I., Zenkin E.Y., E., Bulgakov, N., Golovan, A. et al., «The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units,» SAE Technical Paper 2018-01-1773, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
7. Худяков І.В., Симоненко Р.В., Гришук І.В., Матейчик В.П., Волков В.П., Білоусова Т.П., Володарець М.В. Особливості дистанційної ідентифікації режимів праці та відпочинку водія в системі інформаційного моніторингу транспортних засобів. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Київ: ДУІТ. 2020. вип.№35 С.146-156.
8. Худяков І.В. Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів. Луцький національний технічний університет «Наукові нотатки». Луцьк: ЛНТУ. 2019 вип. 67. С.141-148.
9. Golovan A., Mateichyk V., Gritsuk I., Lavrov A., Smieszek M., Honcharuk I., Volska O. Enhancing Information Exchange in Ship Maintenance through Digital Twins and IoT: A Comprehensive Framework. Computers 2024, 13, 261. <https://doi.org/10.3390/computers13100261>
10. Golovan A., Rudenko S., Gritsuk I., Shakhov A., Mateichyk V. et al., “Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals,” SAE Technical Paper 2018-01-1774, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>.
11. Статистичний щорічник України. Офіц. вид. – К.: Державна служба статистики України, – 2016. – 574 с.
12. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту. Офіц. вид. – К.: М-во транспорту України, 1998. – (Нормативний документ Міністерство транспорту України). – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98>.
13. Бубела А.В., Більчук К.О., Інноваційні підходи до дистанційної діагностики транспортних засобів. Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні підходи у відновленні транспортної інфраструктури в особливих умовах воєнного стану: виклики та перспективи»: збірник тез доповідей / Національний транспортний університет, 23-24 жовтня 2024 р. – К.: НТУ, 2024, – С. 44-47. <https://doi.org/10.33744/978-966-632-328-9-2024-3>.

REFERENCES

1. Mateichyk, V.P., Navrotskyi, A.V. *Systematization of Hardware Schemes for Monitoring Systems of Vehicle Operation*. Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences, Vol. 48, 2024, pp. 184–192. DOI: 10.31498/2225-6733.48.2024.310711.
2. Dmytrychenko, M.F., Mateichyk, V.P., Hryshchuk, O.K., Tsiuman, M.P. *Methods of System Analysis of Automotive Engineering Properties*. Kyiv: NTU, 2014, 168 p.
3. Volkov, V.P., Mateichyk, V.P., Komov, P.B., Gritsuk, I.V., Smeshek, M., Volkova, T.V., Tsiuman, M.P. *Intelligent Transport Monitoring Systems*. Monograph. Kharkiv: NTMT Publ., 2015, 246 p. ISBN 978-617-578-218-7.

4. Volkov, V.P., Mateichyk, V.P., Komov, P.B., Komov, O.B., Gritsuk, I.V. *Organization of Vehicle Technical Operation in the Context of Intelligent Transport Systems Development*. Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Automotive and Tractor Engineering, No. 29, 2013, pp. 138–144.
5. Gritsuk, I.V., Mateichyk, V.P., Symonenko, R.V., Khudiakov, I.V. *Features of Remote Identification of Driver Work Modes in the Information System of Vehicle Monitoring*. *Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia*. Monograph No. 19. Series: Transport. Rzeszow, 2019, pp. 7–15.
6. Gritsuk, I., Zenkin, E.Y., Bulgakov, N., Golovan, A. et al. *The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units*. SAE Technical Paper 2018-01-1773, 2018. <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
7. Khudiakov, I.V., Symonenko, R.V., Gritsuk, I.V., Mateichyk, V.P., Volkov, V.P., Bilousova, T.P., Volodarets, M.V. *Features of Remote Identification of Driver Work and Rest Modes in the Information Monitoring System of Vehicles*. Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technology, Kyiv: DUIT, 2020, Issue 35, pp. 146–156.
8. Khudiakov, I.V. *Database Models of an Information System for Monitoring the Technical Condition of Vehicles*. Scientific Notes, Lutsk National Technical University, Vol. 67, Lutsk: LNTU, 2019, pp. 141–148.
9. Golovan A., Mateichyk V., Gritsuk I., Lavrov A., Smieszek M., Honcharuk I., Volska O. Enhancing Information Exchange in Ship Maintenance through Digital Twins and IoT: A Comprehensive Framework. *Computers* 2024, 13, 261. <https://doi.org/10.3390/computers13100261>.
10. Golovan A., Rudenko S., Gritsuk I., Shakhov A., Mateichyk V. et al., Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals, SAE Technical Paper 2018-01-1774, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>.
11. Statistical Yearbook of Ukraine. Official edition. – Kyiv: State Statistics Service of Ukraine, – 2016. – 574 p.
12. Regulations on the maintenance and repair of road vehicles of automobile transport. Official edition. □ Kyiv: Ministry of Transport of Ukraine, 1998. – (Normative document of the Ministry of Transport of Ukraine). – Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98>.
13. Bubela A.V., Bilchuk K.O., Innovative approaches to remote diagnostics of vehicles. International scientific and practical conference «Innovative approaches in the restoration of transport infrastructure in special conditions of martial law: challenges and prospects»: collection of abstracts / National Transport University, October 23-24, 2024 – Kyiv: NTU, 2024, – pp. 44-47. <https://doi.org/10.33744/978-966-632-328-9-2024-3>

РЕФЕРАТ

Добровольський О.С. Методи оцінки технічного стану транспортних засобів / О.С. Добровольський, К.О. Більчук // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Ефективність експлуатації транспортних засобів, яка визначається сучасними вимогами екологічної безпеки та безпеки дорожнього руху, значною мірою визначається технічним станом їх двигунів внутрішнього згоряння та агрегатів транспортних засобів. Для впливу на технічний стан двигуна та транспортного засобу в цілому необхідна об'єктивна інформація, яку забезпечує технічна діагностика, що базується на різних методах та технічних засобах. Аналіз методів, способів та засобів діагностики транспортних засобів показав їхню велику різноманітність, складність при реалізації в експлуатаційних умовах. А умови експлуатації транспортного засобу визначають необхідність вибору методу діагностики, який би забезпечував із заданою точністю визначення технічного стану двигуна внутрішнього згоряння безпосередньо на транспортному засобі за допомогою автономних та простих засобів технічної діагностики без використання складних навантажувальних стендів. Раніше проведені дослідження дозволяють з необхідною точністю та швидкістю визначати технічний стан транспортного засобу під час діагностики в експлуатаційних умовах. Використання сучасних досягнень інформаційних технологій і засобів зв'язку – телематики – у керуванні транспортними системами дозволяє кардинально підвищити ефективність і якість їх роботи. Тому транспортні системи з використанням автоматизованих систем керування, побудованих на основі телематики – інтелектуальні транспортні системи (ITS) набули широкого розповсюдження та дозволяють отримати інформацію про стан транспортного засобу у віддаленому режимі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ, ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ, ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЯ, СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТРАНСПОРТНА СИСТЕМА.

ABSTRACT

Dobrovolskyi O.S., Bilchuk K.O. Methods of assessing the technical condition of vehicles. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The efficiency of vehicle operation, which is determined by modern requirements for environmental safety and road safety, is largely determined by the technical condition of their internal combustion engines and vehicle units. To influence the technical condition of the engine and the vehicle as a whole, objective information is needed, which is provided by technical diagnostics, which is based on various methods and technical means. The analysis of methods, methods and means of vehicle diagnostics showed their great diversity, complexity when implemented in operating conditions. And the operating conditions of the vehicle determine the need to choose a diagnostic method that would provide with a given accuracy the determination of the technical condition of the internal combustion engine directly on the vehicle using autonomous and simple means of technical diagnostics without the use of complex load stands. Previously conducted studies allow the necessary accuracy and speed to determine the technical condition of the vehicle during diagnostics in operating conditions. The use of modern achievements of information technologies and means of communication – telematics – in the management of transport systems allows to radically increase the efficiency and quality of their work. Therefore, transport systems using automated control systems built on the basis of telematics – intelligent transport systems (ITS) have become widespread and allow to obtain information about the state of the vehicle remotely.

KEYWORDS: VEHICLE, INTERNAL COMBUSTION ENGINE, MAINTENANCE, OPERATION, MONITORING SYSTEM, INTELLECTUAL TRANSPORT SYSTEM.

АВТОРИ:

Добровольський Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри двигунів і теплотехніки, dobrovolskiy@ukr.net, тел. +380666659775, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к.307, orcid.org/0000-0003-0048-1388.

Більчук Костянтин Олександрович, аспірант, Національний транспортний університет, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, bilchuk@gmail.com, тел. +380674051275, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к.218, orcid.org/0000-0003-4369-2070.

AUTHORS:

Dobrovolskyi Oleksandr, Ph.D in Technical Science, Associate Professor, National Transport University, Professor, Department of Engines and Heat Engineering, e-mail: dobrovolskiy@ukr.net, tel. +380666659775, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelianovycha-Pavlenka str. 1, of.307, orcid.org/0000-0003-0048-1388.

Bilchuk Kostiantyn, National Transport University, post-graduate student of the Department of Transport Construction and Property Management, email: bilchuk@gmail.com, tel. +380674051275, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelianovycha-Pavlenka str. 1, of.218, orcid.org/0000-0003-4369-2070.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Сахно В.П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри автомобілів, Київ, Україна.

Грицук І.В., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівська політехніка», професор кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігів, Україна.

REVIEWER:

Sakhno V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Head of the Department of Automobiles, Kyiv, Ukraine.

Gritsuk I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University, Professor of the Department of Automobile Transport and Industrial Engineering, Chernihiv, Ukraine.

ІНТЕГРАЦІЯ ЗАХИСНИХ УКРИТТІВ У ДОРОЖНЮ ІНФРАСТРУКТУРУ: СИСТЕМНИЙ ОГЛЯД МІЖНАРОДНОГО ДОСВІДУ

Кватадзе А.І., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, kvatadze_alina@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3320-3798

Стьожка В.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, styozhka@ukr.net, orcid.org/0000-0002-5039-9852

INTEGRATION OF PROTECTIVE SHELTERS INTO ROAD INFRASTRUCTURE: A SYSTEMATIC REVIEW OF INTERNATIONAL EXPERIENCE

Kvatadze A., PhD in Technical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, kvatadze_alina@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3320-3798

Styozhka V., PhD in Technical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, styozhka@ukr.net, orcid.org/0000-0002-5039-9852

Постановка проблеми. Враховуючи зростаючу вразливість міських територій до військових загроз, порушується питання інтеграції захисних укриттів у дорожню інфраструктуру. У статті здійснено огляд міжнародного досвіду щодо інженерних підходів та прикладів влаштування укриттів, розміщених під дорожньою конструкцією, зокрема у тунелях та підземних переходах. На основі міжнародного досвіду Норвегії, Швейцарії та інших країн проаналізовано ключові конструктивні рішення: SWETO (Shelter Without an exit leading to Escape routes To the Open (укриття без виходу, що веде до шляхів евакуації назовні)), бункери подвійного призначення та протирадіаційні укриття. Окрему увагу приділено проектним викликам і питанням економічної доцільності. Дослідження направлене на практичні орієнтири для імплементації таких рішень, особливо в умовах обмеженого доступу до метрополітену чи спеціалізованих захисних споруд, як у випадку України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Впровадження захисних споруд у транспортну інфраструктуру розглядається як потенційний інструмент підвищення рівня безпеки міського середовища в умовах воєнних загроз і надзвичайних ситуацій. У містах, де відсутня розгалужена система метрополітену або бракує захисних споруд цивільного призначення, питання використання наявної дорожньої інфраструктури, як об'єкта подвійного призначення, набуває практичного і безпекового значення. Одним з напрямів такого підходу є влаштування укриттів у конструкцію транспортних тунелів, сервісних галерей та підповерхневих просторів під дорожньою конструкцією [1,2,3].

Згідно з існуючими на теперішній час дослідженнями, низка країн реалізували проекти використання елементів транспортної інфраструктури з додатковою функцією захисту населення. Зокрема, у Швейцарії в тунелі Сонненберг реалізовано модель протирадіаційного бункера з подвійною функцією [4]. У Південній Кореї та Китаї аналізуються підходи до евакуації з дорожніх тунелів і функціонального зонування захисних просторів у межах транспортних коридорів [5,6].

Метою даної статті є огляд технічних рішень щодо укриттів в дорожній інфраструктурі, а також оцінка можливостей їх адаптації до середовищ із низькою щільністю підземного транспорту на основі міжнародного досвіду. Акцент зроблено на прикладних дослідженнях, актуальних для країн із підвищеним ризиком збройних конфліктів, зокрема України.

Викладення основного матеріалу дослідження. Огляд наукових джерел ґрунтується на зростаючому інтересі до теми подвійного призначення транспортних споруд (автомобільних доріг, дорожніх тунелів) у контексті цивільного захисту, а також на значущості впровадження укриттів для швидкої та доступнішої евакуації населення. Зокрема, в роботі [1] узагальнено технічні параметри однокамерних тунелів із вбудованими укриттями, зосереджена увага на системах вентиляції, евакуаційних маршрутах та нормах безпеки під час пожеж. Автори підкреслюють, що конструктивна інтеграція камер-ніш не суттєво зменшує пропускну здатність транспортного тунелю, однак вимагає ретельного техніко-економічного обґрунтування.

У зв'язку з вищезазначеним, укриття без виходу назовні (SWETO) виступає додатковим засобом підвищення функціональності інфраструктури: окрім стандартного забезпечення руху, вона дозволяє вбудувати в стінки тунелів або безпосередньо в дорожню конструкцію герметичні камери-ніші з вогнетривких матеріалів. За результатами норвезьких досліджень, товщина залізобетонних стінок 10 см забезпечує приблизно 50 хвилин термічної стійкості при сценарії пожежі потужністю 100 МВт, тоді як конструкції із товщиною стінок 15 см мають значний запас міцності. Це орієнтовні показники, що уточнюються під час проєктного моделювання для конкретних умов тунелю. Додаткову безпеку забезпечують бласт-двері з товстого сталевого каркасу з теплоізоляційним наповнювачем, який сповільнює нагрівання внутрішньої поверхні та підтримує прийнятні температурні умови всередині укриття. Такі камери оснащуються також

датчиками диму і токсичних газів, автоматизованими системами фільтрації повітря, а герметична конструкція дозволяє витримати як високотемпературні впливи, так і обмежене ударне навантаження. Завдяки відсутності виходу на поверхню, укриття можуть розташовуватися з інтервалом, визначеним за результатами аналізу ризиків та моделювання евакуації. Мінімальні вимоги ЄС, відповідно до Директиви 2004/54/EC [7], передбачають відстань не більше 500 м між аварійними виходами, тоді як у практиці проєктування в щільній міській забудові допускається скорочення цього інтервалу до близько 200-210 м за належного технічного обґрунтування.

В умовах воєнного стану в Україні SWETO не замінить традиційні громадські сховища, натомість може розглядатися як один із можливих варіантів розширення мережі захисних конструкцій уздовж тунелів і відкритих ділянок автомобільних доріг. Аналогічна технологія може бути адаптована до бордюрної частини доріг населених пунктів чи підземних переходів, що дає змогу водіям і пішоходам під час ракетних ударів або атак безпілотників оперативно дістатися до відносно безпечного простору. Такий підхід доповнить існуючі заходи цивільного захисту, забезпечуючи додаткову гнучкість і оперативність реагування без необхідності масштабного нового будівництва.

У дослідженнях, присвячених тунелям у Китайській Народній Республіці (КНР) [5], розглянуто проблеми евакуації в умовах високої задимленості, складної геометрії споруд і обмеженої кількості евакуаційних коридорів. Навіть за наявності зон тимчасового укриття ефективність їх використання залежить від поведінкових реакцій людей у стресі, рівня видимості та часу прийняття рішень. У роботі [8] наголошено, що дим істотно знижує швидкість руху людей, збільшує час орієнтації та підвищує ризик дезорієнтації. Отже, ефективність евакуації визначається не лише параметрами вентиляційних систем, а й просторовим розміщенням зон безпеки та візуальною доступністю маршрутів.

Аналіз поведінкових чинників у надзвичайних ситуаціях показує, що навіть за наявності чітко позначених маршрутів і належного технічного забезпечення людський фактор залишається вирішальним. Огляд пожеж у тунелях КНР [5] демонструє, що затримка з прийняттям рішень, порушення організованості руху, паніка та дезорієнтація є типовими реакціями в умовах обмеженого простору й низької видимості. Це підкреслює потребу у створенні локальних укриттів, розташованих безпосередньо в межах транспортної інфраструктури, де доступ до безпечної зони можливий упродовж кількох секунд без складної навігації чи переміщення на великі відстані.

У цьому контексті стає очевидною актуальність концепцій, що передбачають локальні укриття в межах дорожньої інфраструктури. Інтегровані у дорожній покрив модулі можуть бути доступні в межах кількох секунд без потреби у складній навігації чи фізичному переміщенні на

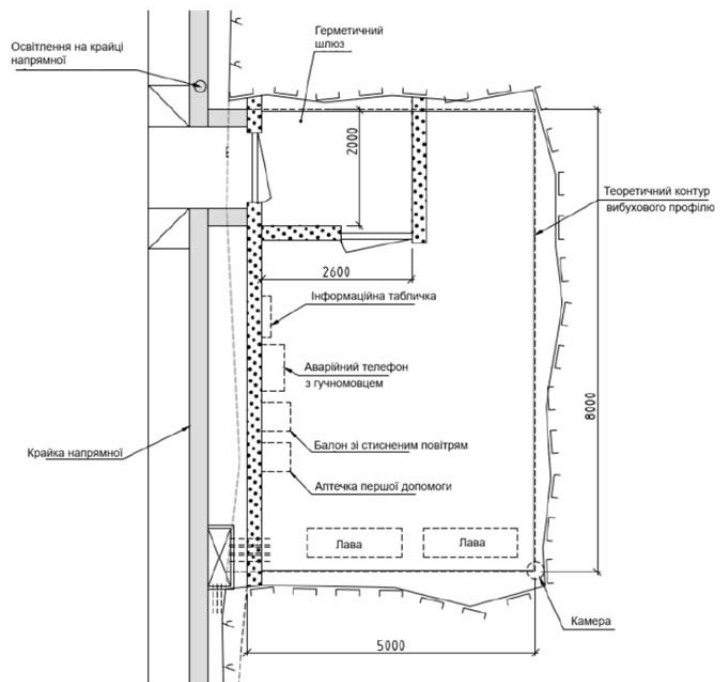


Рисунок 1 – Конструкція SWETO в тунелі Фройя [1]
Figure 1 – SWETO design in the Froya Tunnel [1]

великі відстані. Це забезпечує оперативний захист як для пішоходів, так і для водіїв у випадках раптових атак, техногенних катастроф або бойових дій. Відтак, аналіз поведінкових ризиків в умовах надзвичайних ситуацій підсилює аргументацію на користь впровадження таких рішень у критичних транспортних зонах.

Вдалим прикладом інфраструктури подвійного призначення є система тунелів Зонненберг у Швейцарії [4]. Побудований як дорожній тунель, цей об'єкт може бути оперативно переобладнаний у бункер, здатний вмістити понад 20 000 осіб. Система оснащена фільтраційними установками, водопостачанням, каналізацією та запасами продуктів і медикаментів, що забезпечує автономне функціонування протягом тривалого часу. Водночас, експлуатація такого комплексу потребує регулярного технічного обслуговування, перевірки інженерних систем і постійного оновлення ресурсів. Приклад Зонненберга демонструє як потенціал багатофункціональних рішень, так і виклики, пов'язані з їх довготривалою готовністю.

Узагальнення технічних, поведінкових і експлуатаційних чинників дозволяє обґрунтувати доцільність подальшого розвитку концепції локальних модульних укриттів, інтегрованих безпосередньо в дорожню конструкцію або бічні елементи міської інфраструктури. Такий підхід підвищує стійкість урбанізованих територій до раптових загроз, від повітряних атак і хімічних інцидентів до техногенних аварій, і водночас сприяє формуванню нової культури безпеки у міському плануванні.

Показовим у цьому контексті є досвід Південної Кореї [6], де поступово впроваджується інтеграція укриттів у транспортну інфраструктуру. У Сеулі функціонує понад 3000 захисних об'єктів, частина з яких розташована поруч із транспортними вузлами або безпосередньо інтегрована з ними, автомобільними тунелями, підземними переходами, багаторівневими перехрестями та пересадковими станціями [2]. Хоча більшість цих об'єктів не були спочатку спроектовані як захисні, їх подальша адаптація у відповідь на зростання ризиків свідчить про поступову зміну парадигми міського планування, у якій безпека населення стає органічним елементом транспортної логістики.

У країнах Південно-Східної Азії, зокрема в Сінгапурі, Тайвані та Малайзії, спостерігаються показові приклади інтеграції захисних споруд у багаторівневі транспортні вузли. Згідно з даними дослідження [6], у мегаполісах регіону активно розвиваються концепції комплексного зонування, де одна й та сама інфраструктурна одиниця виконує кілька функцій: транспортну, комерційну та захисну. Укриття інтегруються в підземні комунікації, вентиляційні шахти, пішохідні галереї або технічні відсіки дорожніх розв'язок. Такий підхід забезпечує мінімальні відстані до безпечних зон і високу ефективність евакуації без потреби у масштабному будівництві нових об'єктів.

Для України, особливо в умовах війни, ці приклади мають високу практичну цінність. Середні та малі міста, які не мають доступу до метрополітену або обмежені в ресурсах для будівництва масштабних укриттів, можуть орієнтуватися на моделі адаптивної інтеграції захисних модулів у вже наявну транспортну інфраструктуру. Автомобільні розв'язки, об'їзні тунелі, технічні галереї або навіть розширені ділянки дренажних систем можуть виступати основою для локальних укриттів.

Подальший розвиток таких рішень в українських умовах потребує уточнення вимог у будівельних нормах, зокрема, щодо матеріалів, герметичності, вибухостійкості, автономності систем життєзабезпечення та стандартів взаємодії з інженерними мережами. Це дозволить уніфікувати підходи до проектування локальних укриттів, інтегрованих у дорожню інфраструктуру, і створити основу для масштабного впровадження концепції SWETO.

Хоча в міському середовищі можуть використовуватись і інші типи укриттів, а саме: підвали, підземні паркінги чи частково адаптовані технічні простори (зокрема, зливові каналізації), більшість із них не відповідає базовим критеріям оперативного доступу, безпечного перебування та довготривалої автономності. Їхнє використання ускладнене технічним станом, щільністю забудови, відсутністю публічного доступу або належного утримання.

За цих умов інтеграція модульних захисних конструкцій безпосередньо в тротуарну частину вулиць, пішохідних зон або у транспортну інфраструктуру розглядається як потенційно ефективний підхід до розширення мережі укриттів. Такий формат дозволяє створити додатковий рівень захисту в умовах обмежених ресурсів та високої щільності забудови, забезпечуючи швидкий доступ до укриття без потреби в масштабному новому будівництві.

Показовим є дослідження [9], у якому розроблено бі-рівневу багатокритеріальну модель оптимізації для вибору місць розташування міських укриттів. Запропонований підхід поєднує рівень прийняття рішень органами управління (визначення кількості та розміщення об'єктів) і рівень поведінки населення (вибір маршруту евакуації) в умовах обмежених ресурсів. Модель враховує

показники доступності, ефективності та економічності, а також обмеження за пропускнуою спроможністю укриттів і транспортної інфраструктури.

Розрахунки виконано із застосуванням методу імітації відпалу, що дало змогу досягти балансу між швидкістю евакуації, раціональним розподілом ресурсів і мінімізацією перевантаження укриттів. Результати дослідження підтверджують ефективність використання просторової оптимізації та моделей розміщення-розподілу для планування мережі захисних споруд у щільній міській забудові.

Запропонована модель може слугувати методологічною основою для розроблення українських сценаріїв, адаптованих до умов середніх і малих міст, де відсутній метрополітен, а технічні ресурси є обмеженими. Її принципи дозволяють інтегрувати укриття у транспортно-пішохідну інфраструктуру, включно з тротуарними модулями та об'єктами подвійного призначення в межах дорожніх розв'язок [9].

Для підвищення ефективності системи захисту необхідно розробити методику просторового планування укриттів на основі технічного моделювання та багатокритеріальної оптимізації. Як показано у дослідженні [9], використання бі-рівневих моделей розміщення-розподілу дає змогу визначати оптимальні інтервали між укриттями, виходячи з часу евакуації, пропускнуої спроможності та доступності шляхів руху. Такий підхід дозволяє проектувати мережу укриттів із раціональним використанням ресурсів, забезпечуючи баланс між безпечністю та економічною доцільністю.

Для практичного впровадження концепції SWETO в межах дорожньої інфраструктури доцільно передбачити в національних будівельних нормах окремий розділ, який би регламентував ключові технічні вимоги до таких укриттів. Це стосується насамперед матеріалів конструкцій, герметичності, параметрів вибухостійких дверей відповідно до EN 13123/13124 [12] та критеріїв роботи систем димовидалення й вентиляції відповідно до EN 12101-6 та NFPA 502[10,11]. Час реакції систем визначається сценарно: з урахуванням етапів детекції, автоматичного запуску й досягнення проектних показників тиску та видимості.. Водночас актуальним залишається питання просторової доступності укриттів.

Висновки. Впровадження пілотних рішень у межах автомобільних доріг, транспортних споруд або вулиць та доріг населених пунктів дасть змогу перевірити технічну життєздатність та економічну ефективність таких укриттів у реальних умовах. Результати цього етапу можуть стати основою для формування оновлених будівельних норм і розроблення практичних рекомендацій у сфері цивільного захисту.

Попри те, що SWETO розроблялась як технічне рішення для специфічних інженерних ситуацій, вона демонструє потенціал для ширшого застосування, зокрема, як спосіб забезпечення тимчасового укриття на відкритих ділянках вулично-дорожньої мережі. Йдеться про території, де відсутній доступ до стаціонарних захисних споруд або час, необхідний для евакуації, є обмеженим. У цьому контексті SWETO може розглядатися як гнучке інженерне рішення, яке не потребує масштабного будівництва та може доповнити існуючу інфраструктуру захисту населення. Для цього необхідне подальше технічне опрацювання, адаптація до чинної нормативної бази та узгодження з вимогами цивільного захисту.

Досвід аварій та пожеж у транспортних тунелях, зокрема узагальнений у китайських дослідженнях 2023 року, підтверджує, що навіть за наявності технічних засобів евакуації фактори часу, орієнтації та доступності маршрутів визначають успішність саморятуння. Це ще раз підкреслює важливість створення локальних укриттів безпосередньо в межах дорожньої інфраструктури, які забезпечують миттєвий доступ до захищеного простору без необхідності складної навігації.

Інтеграція модульних укриттів у дорожнє покриття або об'єкти наземної інфраструктури не лише відповідає вимогам адаптивного реагування на сучасні ризики, а й компенсує обмеження традиційної системи сховищ. З урахуванням факторів поведінки людей в екстрених ситуаціях, такі рішення можуть стати дієвим доповненням до існуючої мережі захисних споруд, особливо у середовищах з підвищеним рівнем загроз та обмеженим просторовим ресурсом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Shelters in single-tube road tunnels (2016). Tunnelling and Underground Space Technology. – [електронний ресурс] URL: <https://ebooks.uis.no/index.php/USPS/catalog/book/272>.
2. HuffPost / Seoul Solution (2023). In Seoul, Confusion And Apathy Surround City's 3,200 Bomb Shelters. HuffPost / Seoul Solution. – [електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.huffpost.com/entry/seoul-bomb-shelters_n_59927081e4b09071f69c2539.

3. WHO-EURO (2025). Underground shelters and services in hospitals. Копенгаген: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2025. 11046-50818-77024 (електронне вид.). Ліцензія: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. – [електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.who.int/europe>.
4. Swiss Review (2022). Sonnenberg bunker is drawing attention due to the war in Ukraine. Swiss Review. – [електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.swisscommunity.org/en/news-media/swiss-revue/article/sonnenberg-bunker-is-drawing-attention-due-to-the-war-in-ukraine>.
5. Zhao X., Yang K., Li Y., et al. (2023) Tunnel fire evacuation: A review in China. Fire Technology, Preprint. – [електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/366627318_A_Review_of_Tunnel_Fire_Evacuation_Strategies_and_State-of-the-Art_Research_in_China.
6. Kim S., Kim J., Kim H., et al. (2022). Evacuation of Shelter in Place at Subway Transfer Stations during Tunnel Fires: Case of Seoul. Sustainability, 14(15), с. 5491. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12111981>.
7. European Parliament and Council. Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network. – Luxembourg: Official Journal of the European Union, 2009. – [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A02004L0054-20090807>.
8. Jiang, H. et al. (2024). Effects of fire smoke on evacuation in road tunnels with refuge areas: A simulation study. International Journal of Environmental Research and Public Health, 21(2), с. 275. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12198-024-00275-7>.
9. He, L. & Xie, Z., 2022. Optimization of Urban Shelter Locations Using Bi-Level Multi-Objective Location-Allocation Model. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(7), p.4401. <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/7/4401>.
10. CEN. EN 12101-6:2022. Smoke and heat control systems – Part 6: Specification for pressure differential systems – Brussels: European Committee for Standardization, 2022. – [електронний ресурс]. – Режим доступу: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/5f126835-6b1a-4fbd-ba4b-2fe1d81669e7/en-12101-6-2022?srltid=AfmBOopkUdb6-lOugikuK_RZ0YE_u2tbIILVIS2CBcoCYXEYGDajtFQc.
11. NFPA. NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. – Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2020. – [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fire-gas.com/storage/2024/06/NFPA-502-2020-Tunnel-Road.pdf>
12. CEN. EN 13123-1 / EN 13124-1:2001. Windows, doors and shutters – Explosion resistance – Requirements and classification – Part 1: Shock tube test method. – Brussels: European Committee for Standardization, 2001. – [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/461b9de1-be7f-4ae8-a8c6-7ce5c0c51c18/en-13123-1-2001>
13. CEN. EN 13124-1:2001. Windows, doors and shutters – Explosion resistance – Requirements and classification – Part 1: Shock tube test method. – Brussels: European Committee for Standardization, 2001. – [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d140989d-e237-4f85-b02c-a4ab73c0c67c/en-13124-1-2001?srltid=AfmBOoqgAZWF8aTfGlc8DvwXeDKtIHDLtV3yDtMVL3nWfo5-W1-9PIXG&>

REFERENCES

1. Shelters in single-tube road tunnels (2016). Tunnelling and Underground Space Technology, [online] URL: <https://ebooks.uis.no/index.php/USPS/catalog/book/272>
2. HuffPost / Seoul Solution (2023). In Seoul, Confusion And Apathy Surround City's 3,200 Bomb Shelters. HuffPost / Seoul Solution. – [online]. URL: https://www.huffpost.com/entry/seoul-bomb-shelters_n_59927081e4b09071f69c2539.
3. WHO-EURO (2025). Underground shelters and services in hospitals. Копенгаген: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2025. 11046-50818-77024 (електронне вид.). Ліцензія: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. – [online]. URL: <https://www.who.int/europe>.
4. Swiss Review (2022). Sonnenberg bunker is drawing attention due to the war in Ukraine. Swiss Review – [online]. URL: <https://www.swisscommunity.org/en/news-media/swiss-revue/article/sonnenberg-bunker-is-drawing-attention-due-to-the-war-in-ukraine>.
5. Zhao X., Yang K., Li Y., et al. (2023) Tunnel fire evacuation: A review in China. Fire Technology, Preprint. – [online]. URL: https://www.researchgate.net/publication/366627318_A_Review_of_Tunnel_Fire_Evacuation_Strategies_and_State-of-the-Art_Research_in_China.

6. Kim S., Kim J., Kim H., et al. (2022). Evacuation of Shelter in Place at Subway Transfer Stations during Tunnel Fires: Case of Seoul. *Sustainability*, 14(15), c. 5491. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12111981>.
7. European Parliament and Council. Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network. – Luxembourg: Official Journal of the European Union, 2009. – [online]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A02004L0054-20090807>
8. Jiang, H. et al. (2024). Effects of fire smoke on evacuation in road tunnels with refuge areas: A simulation study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(2), c. 275. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12198-024-00275-7>
9. He, L. & Xie, Z., 2022. Optimization of Urban Shelter Locations Using Bi-Level Multi-Objective Location-Allocation Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), p.4401. [online]. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/7/4401>
10. CEN. EN 12101-6:2022. Smoke and heat control systems – Part 6: Specification for pressure differential systems – Brussels: European Committee for Standardization, 2022. – [online]. URL: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/5f126835-6b1a-4fbd-ba4b-2fe1d81669e7/en-12101-6-2022?srltid=AfmBOopkUdb6-lOugikuK_RZ0YE_u2tbIILVIS2CBcoCYXEYGDajtFQc
11. NFPA. NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. – Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2020. – [online]. URL: <https://fire-gas.com/storage/2024/06/NFPA-502-2020-Tunnel-Road.pdf>
12. CEN. EN 13123-1 / EN 13124-1:2001. Windows, doors and shutters – Explosion resistance – Requirements and classification – Part 1: Shock tube test method. – Brussels: European Committee for Standardization, 2001. – [online]. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/461b9de1-be7f-4ae8-a8c6-7ce5c0c51c18/en-13123-1-2001>
13. CEN. EN 13124-1:2001. Windows, doors and shutters – Explosion resistance – Requirements and classification – Part 1: Shock tube test method. – Brussels: European Committee for Standardization, 2001. – [online]. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d140989d-e237-4f85-b02c-a4ab73c0c67c/en-13124-1-2001?srltid=AfmBOoqgAZWF8aTfGIC8DvwXeDKtIHDLTv3yDtMVL3nWFO5-W1-9PIXG&>

РЕФЕРАТ

Кватадзе А.І. Інтеграція захисних укриттів у дорожню інфраструктуру: системний огляд міжнародного досвіду. / А.І. Кватадзе, В.В. Стюжка // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025.

У статті здійснено огляд міжнародного досвіду інтеграції захисних укриттів у дорожню інфраструктуру на прикладі країн Європи та Азії. Проаналізовано технічні, конструктивні та поведінкові аспекти впровадження укриттів подвійного призначення, зокрема, системи SWETO, а також визначено можливості їх адаптації до умов України. Особливу увагу приділено проектним викликам, питанням економічної доцільності, поведінковим ризикам під час евакуації та доступності укриттів для населення.

Об'єкт дослідження – процес інтеграції захисних укриттів у транспортну інфраструктуру, як елемент системи цивільного захисту.

Метою роботи є систематизація міжнародного досвіду створення укриттів подвійного призначення в дорожній інфраструктурі та визначення шляхів його адаптації до українських умов.

Метод дослідження. Аналіз, порівняння, систематизація міжнародних практик, узагальнення технічних і поведінкових аспектів, системний підхід.

Сучасні умови воєнних загроз вимагають переосмислення підходів до проектування транспортної інфраструктури як потенційного елементу системи цивільного захисту. Міжнародна практика показує, що інтегровані укриття (SWETO, багатофункціональні тунелі, бункери подвійного призначення) можуть забезпечити оперативний захист населення без необхідності масштабного нового будівництва. Такі рішення успішно реалізовано у Швейцарії, Норвегії, Південній Кореї та Китаї. У статті підкреслено, що для України доцільним є поступове впровадження модульних укриттів у межах існуючих дорожніх об'єктів із урахуванням технічних, соціальних і нормативних чинників.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ, ДОРОЖНЯ КОНСТРУКЦІЯ, ДОРОЖНІ ТУНЕЛІ, ЗАХИСНІ СПОРУДИ, ІНФРАСТРУКТУРА ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ, УКРИТТЯ, SWETO.

ABSTRACT

Kvatadze A., Stozhka V. Integration of Protective Shelters into Road Infrastructure: A Systematic Review of International Experience. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article presents a systematic review of international experience in integrating protective shelters into road infrastructure based on case studies from Europe and Asia. The research analyses technical, structural, and behavioural aspects of implementing dual-purpose protective facilities, including the SWETO system, and assesses their potential adaptation to Ukrainian conditions. Special attention is paid to design challenges, economic feasibility, behavioural factors during evacuation, and accessibility of shelters for the population.

Object of research – integration of protective shelters into transport infrastructure as part of the civil protection system.

Purpose of the study to systematize international experience in implementing dual-purpose protective shelters within road infrastructure and identify ways of adapting these solutions to the Ukrainian context.

Research methods. Analysis, comparison, systematization of international practices, generalization of technical and behavioural aspects, and a systems approach.

The modern context of military threats requires reconsidering the role of transport infrastructure as a potential component of civil protection systems. International practice demonstrates that integrated shelters (SWETO, multifunctional tunnels, dual-purpose bunkers) can ensure rapid protection for the population without extensive new construction. Successful implementations have been recorded in Switzerland, Norway, South Korea, and China. The study highlights the relevance of modular shelters embedded into existing Ukrainian road facilities, taking into account technical, social, and regulatory factors.

KEYWORDS: SHELTERS, ROAD STRUCTURE, PROTECTIVE FACILITIES, ROAD TUNNELS, DUAL-PURPOSE INFRASTRUCTURE, SWETO, HIGHWAYS.

АВТОРИ:

Кватадзе А.І., Національний транспортний університет, кандидат технічних наук, доцент кафедри дорожньо-будівельних матеріалів та хімії, e-mail: kvatadze_alina@ukr.net, тел. +380662100191, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, <https://orcid.org/0000-0003-3320-3798>

Стьожка В.В., Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, кандидат технічних наук, доцент, e-mail: styozhka@ukr.net, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, <https://orcid.org/0000-0002-5039-9852>

AUTHOR:

Kvatadze A., National Transport University, Ph.D. in Technical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kvatadze_alina@ukr.net, тел. +380662100191, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelianovycha-Pavlenka St.1, <https://orcid.org/0000-0003-3320-3798>

Stozhka V., National Transport University, Associate Professor of the Department of Transport Construction and Property Management, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: styozhka@ukr.net, Ukraine, 01010, Kyiv, 1 Omelianovycha-Pavlenka St., <https://orcid.org/0000-0002-5039-9852>

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Мозговий В.В. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Національний транспортний університет, Київ, Україна.

Бугаєвський С.О. доктор технічних наук, професор, декан дорожньо-будівельного факультету, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна.

REVIEWER:

Mozghovyi V.V. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Road-Building Materials and Chemistry, National Transport University, Kyiv, Ukraine.

Buhaiovskiy S.O. Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Road Construction Faculty, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine.

СИМВОЛЬНА ЦИФРОВІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ ПОЛІЕРГАТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ ГЕОНООСФЕРИ

Комісаренко О.С., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, olenakomisarenko@ukr.net, orcid.org/0000-0002-7436-6473

Баранов Г.Л., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, baranovgl2018@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2494-8771

Метельська Д.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна, metelskadasha@gmail.com, orcid.org/0009-0002-2804-3101

Войденко О.К., Національний транспортний університет, Київ, Україна, mrjerichoo@gmail.com, orcid.org/0000-0003-0818-6172

SYMBOLIC DIGITALIZATION OF TECHNOLOGIES FOR INTELLIGENT TRANSPORT OF POLYERGATIC PRODUCTION OF THE GEONOSPHERE

Komisarenko O.S., PhD, National transport university, Kyiv, Ukraine, olenakomisarenko@ukr.net, orcid.org/0000-0002-7436-6473

Baranov G.L., Doctor of Technical Science, National transport university, Kyiv, Ukraine, baranovgl2018@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2494-8771

Metelska D.V., National transport university, Kyiv, Ukraine, metelskadasha@gmail.com, orcid.org/0009-0002-2804-3101

Voydenko O.K., National Transport University, Kiev, Ukraine, mrjerichoo@gmail.com, orcid.org/0000-0003-0818-6172

Постановка проблеми.

Актуальність даної теми дослідження обумовлена проблемами сучасного транспорту. Поліергати́чна парадигмальність лінгвістики й формальних граматик породжують мови символічної цифровізації майбутніх масштабних технологій для наступного геоніосферного інтелектуального транспорту й гармонії та збалансованості поліергати́чних виробничих організацій різних форм власності. Головна проблема вимагає зберегти життя там, де поки ще поточкові частки багатокритеріальна пошукова й практична потреба шляхом прискореного подолання нерівності та транспортних вихлопів здійснюють масштабне забруднення космосу, атмосфери, водних акваторій, родючих ґрунтів. Тому нові двигуни транспортних засобів вже зберігають біосферу, флору, фауну та в цілому екологічний стан геоніосфери.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні потреби підвищення ефективності поліергати́чних виробничих організацій відомих галузей людської діяльності забезпечуються завдяки сталого розвитку інноваційних транспортних систем. У наслідок лавиноподібного зростання обсягів транспортування різноманітних речовинних та інформаційних продуктів виникають небажані ефекти у транспортній інфраструктурі міжнародних сполучень. Зараз вочевидь існує гальмування та запізнення часу отримання замовлених продуктів, товарів, послуг від незбалансованих засобів автоматизації приватних рішень [1-9].

Сучасні штучно побудовані роботи зі штучним інтелектом (AIR – Artificial Intelligent Robot) для приватних задач соціальної, економічної, виробничої, наукової, освітньої, енергетичної та всіх інших сфер діяльності порушують природну парадигмальність фізично натурних об'єктів єдиної геоніосфери. Таким чином, функціональні перетворення при змінах епохальних станів наступного розвитку вимагають забезпечувати ресурсну збалансованість розподілених коаліційних дій та технологій [10-13].

Проблеми збалансованості кожної поточної складної динамічної системи (ПСДС) за потреб регіонів геоніосфери нерозв'язуються по окремим малим часткам. Системотехнічна повнота ПСДС призводить до необхідності одночасного, паралельного, масштабного удосконалення (реформування), як об'єктів управління (ОУ), так і різноманітних засобів гарантовано адаптивного управління (ГАУ) ієрархічної організації інноваційної транспортної метасистеми різних класів та видів [1-9].

Поки засоби ГАУ не забезпечать раціональний узгоджений баланс між всіма фізичними процесами багатоконтурних ОУ, то у статистичних державних звітах, що спроможні відображати

лише реальні факти, дана тематична проблема ПСДС буде характеризувати: відмови, низьку продуктивність, високу вартість, аварійність, відключення та аварії. Найбільш детальна статистика провідних держав світу фіксує фактичні дорожно-транспортні пригоди у всіх (трубопровідні, залізничні, автомобільні, водні, повітряні, космічні, спеціальні) видах транспортних систем.

Обґрунтування проблеми. Парадигмальність суспільної діяльності з стародавніх часів *Homo sapiens* відбувалась в різноманітних формах розподілу функції добутку цільових продуктів для більшості та соціального управління запасами й наявними ресурсами [14-15]. Історично-соціальна нерівність завжди існувала. Тому особливо у кризових станах збоку Верховної влади підтримували авторів ідеї дієвого об'єкта (Авідо). Принципове покращення інструментальної технології (алебарда, колесо, порох, машини) [16] за рахунок інтелекту тимчасово надавало першовладникам переваги над сусідами. В наш час переходу до 21 століття комп'ютерна техніка, космічний та інтернет зв'язок суттєво змінили життя громади. Наша епоха наряду з великим розвитком об'ємом Smart технологій та публікацій [17-19] не змінює соціальну нерівність за парадигмою переваг і недоліків сучасного бізнесу, включно ризиків небажаних інцидентів [19], конкуренції, розбалансованості відомих технологічних процесів побудови інтелектуальних транспортних систем (ІТС) та поліергатичних виробничих організацій (ПЕВО). Звичайно, поки що існуючі регламенти, включно ISO/IEC, не визначають нові конструктивні, конкурентнопривабливі Авідо. Наприклад, в першу чергу щоб мати переваги над традиційними рішеннями стосовно функціонування інноваційних метасистем треба мати інші нові енергетичні мобільні двигуни класу EMV (Energy Mobile Vehicles of Transport) [20-25]. Вчені провідних фірм більше уваги приділяють частковим локальним питанням аналізу сучасного нестационарного стану [3-5, 7, 8, 14, 16].

Мета та задачі дослідження. спрямована на цифровізацію інформаційно інтелектуальних технологій для підвищення інноваційних техніко-економічних показників ПСДС й відповідних енергетичних мобільних двигунів класу EMV з високими значеннями коефіцієнтів корисної дії ($0,5 < \text{ККД} < 1$) та прибутковості ($\text{КПД} > 1$) за результатами майбутніх соціальних місій всіх видів транспорту. Задачі синтезу принципово нових засобів ГАУ потребують також поглиблення та розвиток. Наприклад, бортові інформаційні керуючі комплекси (БІКК) інтелектуальних транспортних систем з просторовими електронними картами [9, 10, 21] та довідниковою інформаційною системою (ECDIS [9, 10, 21]), відповідно для конкретній праці ІТС, EMV, бізнесу, ПЕВО у майбутній геonoосфері наукової обізнаності (STSA – Space Time situational Awareness).

Об'єкт дослідження – процеси побудови новітніх інформаційних технологій раціональної цифровізації майбутніх конструктивних рішень високоприбуткового інтелектуального транспорту й поліергатичних виробничих організацій ПСДС.

Предмет дослідження – моделі, методи та нові засоби системо-технічних інформаційних технологій, що за рахунок символічної цифровізації вже на етапах моделювання об'єктів проривних Авідо гарантують засобами КІТ точні, надійні, ефективні прибуткові закони оперативного управління ПСДС. Задачі ГАУ швидко реалізувати збалансовані режими: генерації потужності інноваційним транспортом без забруднень; розподілу ресурсів та енергії споживачам; виробництва високошвидкісної якісної продукції; розвитку в цілому економіки системо-утворюючих регіонів геonoосфери вже чистої «зеленої» екології [14, 19].

Методи досліджень: аксіологічні основи науки; системний аналіз та синтез; математично-аналітичне моделювання; теорія подібності, розмірності, символічного кодування; методи ймовірності та статистики; інтегральних та диференціальних перетворень; надійності та функціональної стійкості складних динамічних систем.

Основні наукові результати дослідження. Потоківі складні динамічні системи (ПСДС), що за потреб цивілізованого суспільства зв'язують джерела промислового виробництва (харчової рідини, сировини нафто-, газо-, хімічних речовин, продуктів в контейнерах та транспортних ємностях) з масовими розосередженими у просторі та часі споживачами за допомогою мережних засобів транспортування доцільно розвивати на майбутні потреби суспільства, моделювати та оптимізувати згідно математичних описів теорії графів [1, 6].

Кожен потік між парою вузлів V_i та V_j характеризує ребро графа V_{ij} (зв'язок, гілка, канал, траса, труба, магістраль тощо у ПСДС), але всі режими даного потоку залежать від робочого стану повномасштабної мережі за законами Кірхгофа [12]. Складність нормальних, перехідних та динамічних (при значних імпульсних збуреннях) режимів насамперед обумовлена загальною кількістю сучасних джерел, вузлів, ребер та точок споживання у реальних (табл. 1) транспортних мережах. Збурення, завади, загрози та інші фактори впливу на транспортну мережу обумовлені глобальним зовнішнім незалежним оточуючим середовищем (ЗНОС). Випадковий, стохастичний та

квазіперіодичний масштабний вплив ЗНОС ускладнює боротьбу за живучість, функціональну стійкість та надійність транспортних комунікацій у будь-яких кліматичних зонах, несприятливої погоди, збігу негараздів, лиха. Ризики та невизначеність також залежить від неадекватної реакції людського фактору збуреного соціуму під час ресурсних обмежень та витрачання запасів палива, енергії, матеріалів.

Інтелектуальний характер майбутнього транспорту при всіх кризових, критичних, загрозливих ситуаціях повинен забезпечити гарантоване адаптивне управління об'єктами інтелектуальних транспортних систем в умовах короточасних інтервалах прийняття без катастрофічних рішень з швидким маневруванням та захистом складних динамічних систем суспільного значення. Таким чином символічна цифровізація складних динамічних систем різноманітних видів транспорту спрямована на інтелектуальну ефективність ухилення від катастроф.

Сфера породжуючих мов лінгвістики формальних граматик розпочата у XX столітті Н.Хомським для пошуку принципів ефективною цифровізації процесів побудови майбутніх конструктивів комп'ютерних інформаційних технологій (КІТ). Зараз гостро потрібен високоприбутковий інтелектуальний транспорт для розвитку економіки геоеосфери. Теорія й практика інноваційної діяльності завжди починається з етапів моделювання об'єктів проривних Авідо. Принципи розподілу функцій між людиною та машиною (НМІ) майже не змінюють сутність транспортних задач та нагальних потреб ПЕВО [5-8, 10].

Вперше для фахівців поліергатичних виробничих організацій (ПЕВО) Дональд Кнут розробив принципи проектування символів шрифту та текстового процесору, щоб принтери були з високою якістю друку. Авідо Д.Е. Кнута за сучасними схемами методів візуалізації, наприклад, діаграм активності відображала почергові за замовленням суспільства XX століття перетворення знань КІТ для технологій видавництва будь-яких текстів з описами ІТС, EMV, критеріїв ПЕВО.

Керовані взаємовідношення при зростаючих обсягах комп'ютерних сховищ даних для КІТ з процесорною продуктивністю повинні бути інтелектуальними за потреб обробки інформації відповідно обраних програмно-апаратних комплексів (ПАК).

Наприклад, карта галактики, що видима з землі (відома, як Чумацький шлях) за астрономічними даними об'єднує мільярди зірок й міжзоряну матерію, які залежать від різної будови та розмірів гравітаційних сил у даній частині всесвіту. Технології сучасного термінального відображення (друкованих навігаційних карт, фото-, кіно-, теле- матеріалів) вибудована на матрично-пиксельних описах математичних точок на розмірній площині екрану (робочого вікна, боксу, прямокутного простору) БІКК ІТС [6].

Реальні оригінальні об'єкти Всесвіту багатомірні. Але на прямокутній площині модель цього об'єкта, як параметризована математична точка завжди має $3 \leq r \ll N$ значно меншу вимірність. Геометричні на екрані КІТ розташування, координати точок зберігають точні відношення, що означені у оригіналі (наприклад, велика і мала Магелланові хмари, як пара найближчих галактик відповідно віддалені на 163 та 196 тисяч світлових років) [1]. Об'єкти ECDIS Smart технологія маневрування ІТС вже відображає на екранах БІКК.

Дана аналогія підкреслює, що вхідні дані та необхідні методи для ІТС, ПЕВО, НМІ завжди обирає людина, фахівець, експерт транспортної галузі. Він володіє накопиченими знаннями проблем та задач практичного їх застосування для конкретних транспортних задач. В нашому дослідженні ключовим принципом є те, що для комп'ютерних інформаційних технологій символічної цифровізації вхідні різноманітні дані оригіналу можуть бути різні. За потреб кожної поліергатичної виробничої організації (ПЕВО) різних галузей людської діяльності потік різноманіття даних обумовлений лише у мовнолінгвістичній соціальній сфері. Необхідні і достатні дані включно характеризують: мови спілкування, діалогу; описи проблем, задач; різноманіття критеріїв, операторів; процеси для узгодження цільових результатів. Методи лінгвістики (алфавіти, слова, речення, синтаксис, онтологія, семантика, граматики) далі організують внутрішні перетворення (отриманих зовнішніх даних) засобами КІТ для типових програмних модулів (ТПМ) у цифрові символічні значення кодів [0,1] бінаризованих описів за потреб безпеки, надійності, швидкості, транспорту.

Причини парадигмальності запропонованої ЦІТ для ІТС.

По-перше, за наявними засобами САПР, СППР дуже довго потрібно очікувати онлайн результатів техніко-технологічних рішень ТТР. По-друге, фінансовий бюджет має стрімке зростання тарифу послуг за «інформацію». По-третє, витрати завжди обмежені, але вони випереджають вартості базових потреб real-time цілих галузей гарантованого адаптивного управління ГАУ людської діяльності. Для неперервних життєвих циклів речовинних метаболізмів кожної людини та біоценотів потрібно мати завчасно продукти споживання.

Засоби НМІ повинні дати водіям, операторам, пілотам лише уявлення про: будову простих паралельних програм на мові паралельного програмування API; про паралельні програми, що настроюються на специфіку й призначення обчислювальної системи, як на параметр; практичне освоєння функцій парних і колективних взаємодій між гілками паралельної «хмарної» програми.

Методи розпаралелювання та моделі програм, підтримувані API. Найважливішою особливістю API є те, що під час швидкісних рейсів водій – користувач немає часу на зайві подробиці при написанні своїх паралельних програм, тому не повинен враховувати архітектурні особливості фірмових конкретних мультикомп'ютерів. Оскільки API надає фахівцям – розробникам ТПМ та ПАК віртуальний мультикомп'ютер з розподіленою пам'яттю і з віртуальною мережею зв'язку між віртуальними комп'ютерами. Користувач, водій транспортного засобу з EMV двигунами замовляє лише тему, об'єкт праці, наприклад ECDIS, але за конкретною топологією зв'язків між комп'ютерами не їх кількість комп'ютерів, необхідну для вирішення його задач. API у межах on-in реалізує це замовлення на конкретній фізичній системі. Обмеженням є обсяг оперативної пам'яті фізично наявного мультикомп'ютера БІКК. Таким чином, фахівець ІТС – користувач працює у віртуальному середовищі, що забезпечує переносимість його оперативних потреб для паралельних програм ЦПТ. Система API за потреб КІТ являє собою бібліотеку засобів паралельного програмування для мов C та Fortran 77, що верифіковані, як типові програмні модулі (ТПМ) БІКК та ECDIS за потреб ІТС [20-25].

Ефективність паралельної взаємодії розподілених програм істотно залежить від співвідношення часу обчислень до часу комунікації між комп'ютерами. І чим менше в процентному відношенні частка часу, витраченого (при обміні даними) на комунікації, тим більше ефективність ЦПТ в загальному часі обчислень. Для паралельних систем з передачею повідомлень оптимальне співвідношення між обчисленням і комунікаціями забезпечують методи макроблочного розпаралелювання. Тоді паралельні алгоритми будуються з великих ТПМ і рідко взаємодіючих блоків. Задачі, які з часовими запізненнями вирішуються сітковими і іншими методами, досить ефективні для символічної лінійної алгебри, якщо заздалегідь отримати точні розпаралелені наближення моделі траєкторних рухів та можливих миттєвих уточнень з безпеки в умовах надзвичайних подій.

Ергатичні режими та паралельний інтерфейс API для інтелектуалізації транспортних систем. Головне призначення кожного виду інтерфейсу для гібридних обчислень – це гарантоване забезпечення зв'язків між компонентами комп'ютерної інформаційної технології системи або ПАК на сучасних елементах HSC (High Speed Computation) найвищої швидкості обчислення (рис. 1 та рис. 2) розрахункової обробки модулів даних.

Поняття потужності HSC фіксує існування базової гарантованої властивості цифрових та сигнальних засобів. Транспортні задачі лінгвістичні просторово-часової конфігурації (ПЧК) потребують перетворювати у просторово-часові коди STC конфігурацій. Кожен стан ПАК (вхідний begin та інший замовлений end вихідний) модульної обробки < вхід/вихід > прийнято стандартом ISO можливо характеризувати трійкою: довжина лінгвістичного слова; кількість даних у стандартних регістрах (наприклад, 4, 8, 16 бітових двійкових (0,1); відповідні описи вихідних даних.

Кількість K адресних слів пам'яті відповідних сховищ (терабайт) (наприклад, в кодах ASCII – American Standard Code for Information Interchange для обмінів інформацією) впливає на час очікування інформації для ІТС. Згідно фіксованої HSC схеми БІКК та ECDIS функціонального призначення можливо збільшити швидкість $\dot{X}$ виконуваних стандартних регламентованих команд. Конструктивні засоби ПАК для інтегральних схем уніфікованого призначення, що орієнтовані на застосування ІТС для перевезень конкурентоздатної продукції у межах конкретного роду, покоління (сертифіковані, верифіковані, означені ТТХ – техніко-технічними характеристиками фірм виробників) будуються завдяки концепції цифровізації ІТС та потреб споживачів ноосфери.

Багатофункціональні блоки-модулі електронної технології з'єднання у цілісну замовлену конфігурацію ПАК мають (рис. 1) порти P_i паралельного вводу-виводу за принципами API. Кожен P_i має власний механізм – схему для забезпечення узгоджених інтерфейсних властивостей: K – сигналів команд управління; l – сигналів адресування оперуємих даних; $\dot{X}$ – сигналів операції за потреб обробки згідно синхронізації життєвого циклу інтервалів тактових (часових або частотних) імпульсів багатофункціонального модуля ТПМ КІТ за стандартними принципами API.

Перша міра характеристики потужності застосовується для процедур порівняння різних серій ПАК відповідно l фіксованої довжини слова даних. Зараз фіксують (рис. 2) типові слова мов (розрядність за потужністю збільшується) відповідну довжиною 4, 8, 12, 16, 32, 64 біт за замовлені кількості розрядів.

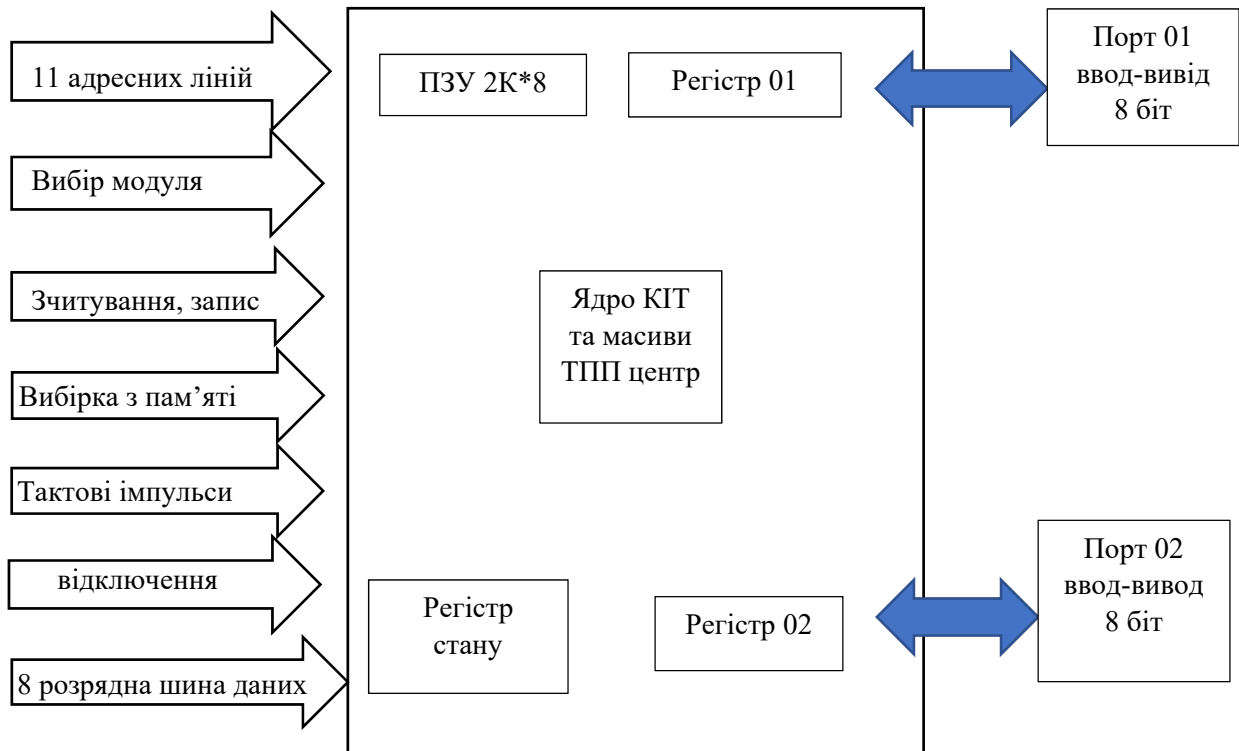


Рисунок 1 – Приклад схемотехніки конструктивної організації для управління, адресації й обробки даних з високою точністю real-time реалізації БІКК ІТС

Figure 1 – An example of circuitry for structural organization for control, addressing and data processing with high accuracy of real-time implementation of BICC ITS

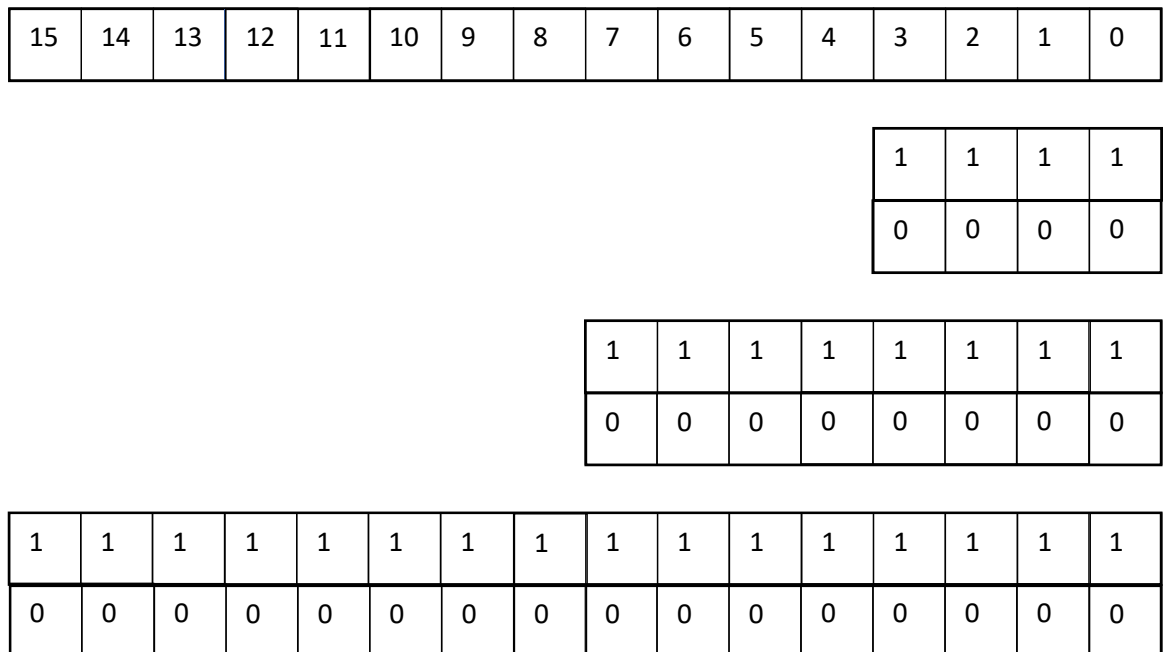


Рисунок 2 – Схема позиціонування бітів КІТ двійкової системи числення

Figure 2 – Positioning scheme of KIT bits of the binary numbering system

Приклад, на (Рис. 2) для 4, 8, 16 розрядів опису 1 двійкового (0,1) слова фіксує логіку (нумерація звичайно з права на ліво та при переході у старший розряд вага його збільшується). За стандартними восьмибітне слово має назву 1 байт=8біт, що спрощує подальше масштабування розмірів пам'яті єдиного інформаційного простору (ЄІП). Для оцінок певного конкретного об'єкту простору опису слів ЄІП застосовують умовні скорочення. В коді BCD (Binary Coded Decimal) довжина у 4 біти достатня для точної фіксації десяткового символного знаку коду ЦІТ у двійковій системі числення. У випадках адресації пам'яті оперативного призначення 4 біти забезпечують доступ до 16 різних слів-кодів. В (табл. 1) означені відповідні можливості програмно-апаратного комплексу ПАК КІТ, що цифровізовані за потреб ІТС.

Таблиця 1 – Типові шаблонні поняття адресного єдиного інформаційного простору відповідно до розмірів l оперуемого слова.

Table 1 – Typical template concepts of the addressable unified information space of the according to the size l of the operated word.

Довжина l слова, біт	Діапазон об'єму внутрішньої ЦІТ та зовнішньої ЄІП адресації	
	фактично	Візуальні символи
4	4096	4-8 к (кіло)
8	65536	65 к (кіло)
16	65536	65 к (кіло)
ЄІП	1048576	1(М); 2(М);4(М) (Мега)

Спеціальне за замовчуванням позначення (у дужках одною літерою к, М, Г) позначає масштаб округлення відповідно до 10^{+3} кіло, 10^{+6} мега, 10^{+9} гіга для визначення у байтах наявного обсягу пам'яті БІКК та ECDIS ІТС, що порівнюємо з наявними іншими КІТ за потужністю. Рівність за потужністю буває коли розміри в бітах отримані шляхом оцінки добутку слова програмно-апаратного комплексу на відповідну одиницю довжини біт/слова. Наприклад, всі слова у байтах: $65536 \text{ слів} * 8 \text{ біт/слів} = 524288 \text{ біт}$; $163784 \text{ слів} * 32 \text{ біт/слів} = 542288$.

Різні засоби пам'яті згідно необхідних і достатніх сховищ Big Data застосовують другу міру К характеристики потужності програмно-апаратного комплексу для знання обсягів єдиного інформаційного простору або діапазону адресації об'єктів КІТ. Існують різні електронні технології LLM обробка інформації.

Третя міра X характеристики потужності програмно-апаратного комплексу (ПАК включно і майбутнє очікуємі наступні покоління) дозволяє знайти обчислювальну швидкість виконання керованих команд. Практика фіксує фактичну тривалість часу циклу <вибірка – виконання> кожного одного кроку (команди) відповідної програми у кодах електронної машини, що має особливості (всіх наявних за техніко-технологічних характеристик фірм-виробників) конкретних засобів операційної реалізації.

Тривалість виконання реально однієї однакової команди операції фактично різна. Даний результат ЦІТ враховуємо відповідно до електронної бази та насамперед максимальної частоти генератора тактових імпульсів. Тому конструктивні порівняння чи фактичні випробування доцільно здійснювати за спеціальних тестових програм контрольного прогнозу й метрологічного виміру. Наприклад, бітові мікропроцесори з генераторами тактових імпульсів порядку сотень кілогерц дозволяють забезпечити оцінку тривалості часу від 10 до 20 МКС. В той же час, коли на отримання результатів тактова частота буде порядку 5-10 мегагерц затримка очікування не перевищить десятої долі мікросекунди.

Вище означення три міри поняття потужності HSC, ще недостатні для означення сутності, особливості та специфіки функціонування (СОСФ) потужності спеціальних та майбутніх (поколінь) ЦІТ для ІТС. БІКК та ГАУ EMV можуть бути з суто різними конструктивно за: архітектурою, концепцією й конфігурацією. Головну причину конструктивної розбіжності обумовлює розподіл визначальних інтелектуальних «функцій між групами паралельного функціонування компонент у

єдиному інформаційному просторі». Майбутнє розширення ієрархічної ІТС та ПЕВО потрібне для надання у результаті синтезу нових інтелектуальних продуктів без забруднення геоеосфери.

Значне зростання складності (дуже складних алгоритмічних перетворень потрібних зараз та ще й перетворень підвищених для майбутнього) обчислень вже суто гальмує практику застосування традиційних НСC досягнень мікроелектроніки сьогодення. Завдяки символічних кодів ЦІТ можливо подолати означені недоліки та розвинути інтелектуальну самоорганізацію ІТС.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямі.

Проблеми комп'ютерної цифровізації цілих галузей людської діяльності однозначно фіксують: зростання обсягів накопичуваних знань, які не завжди систематизовані; переклад з природної мови діалогового спілкування ІАС-ОПР на мову НСC завжди тривалий, коштовний, неоднозначний, ймовірносний тому відбувається похибки та відхилення досвіду фактів від планових міркувань; природна цілісність речей ПСДС сучасного й майбутнього розвитку ноосфери існує лише за умов знання законів (квантово-атомно-молекулярного-біогенного рівнів їх організації) для створення потрібних ринку матеріалів з замовленими властивостями та потребами їх транспортування.

Запропоновано для теорії розвитку інформаційно-керуючих засобів гарантованого адаптивного управління об'єктами інтелектуальних транспортних систем застосовувати цілісне категоріально-функторне поняття «науково-методичний апарат» на аксіологічній основі множинності математичної організації «алгебраїчна система». Доведено, що за необхідних та достатніх умов подібності означеної пари понять реальні майбутні події суспільних полієргатичних виробничих організацій можливо. Формалізовано будуть умови одночасного прояву локальних майбутніх ризиків й впливів факторів взаємодіючого природного середовища без форс-мажорних обставин в сфері оригінального обмеженого просторово-часового континуума. Моделювання в цілому відображає єдиний природно-технологічний комплекс, а також доводить де, коли та як існує практика реалізації прогностичних конструктивних та інноваційно ефективних техніко-технологічних рішень. Знання цих актів завдяки моментам дії інформаційно-керуючих засобів гарантують безпеку, надійність, екологічну економічність оперативного управління без пригод, аварій, катастроф під час транспортування.

Зафіксовано наукову двоїстість у штучній специфічній сфері алгебраїчних систем ефективного моделювання ІТС. Запропоновано на основі однозначних кодів цифрових інформаційних технологій вирішувати задачі практики ІТС завдяки перетворень математичних зображень різноманітних гетерогенних об'єктів ПЧК згідно доказової апробованої теорії. Описано нову будову двоконтурної множини взаємодії між запропонованими програмно-апаратними комплексами ПАК_i з'єднаними мережами Internet. Визначено механізми застосування наявних традиційних ЦІТ та мовних ресурсів ІАС.

Запропоновано з метою швидкого та адекватного відображення результатів синтезу інноваційних структурних композицій на аксіологічній основі алгебраїчних символічних зображень скінченного рангу застосовувати алгебраїчну символізацію описів законів дії ІКЗ для точно самоорганізованих за мінімаксними критеріями, що й попередньо накопичені властивості кодованих структурних груп ЦІТ індуковані інтелектуальними агентами цілісної нової інтелектуальної транспортної системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Баранов Г.Л. Структурное моделирование сложных динамических систем / Г.Л. Баранов, А.В. Макаров – К.: Наукова думка, 1986. – 272 с.
2. Баранов В.Л. Системоаналоговое и квазианалоговое моделирование / В.Л. Баранов, Г.Л. Баранов //Електрон. моделирование. – 1994. – №4 (16). – С. 9-16.
3. Бортини де Р.О., Кузнецов П.Г. Множественность геометрий и множественность физик // Моделирование динамических систем. – Брянск, 1974. – С. 18-29.
4. Бідюк П. І. Моделювання та прогнозування нелінійних динамічних процесів / П. І. Бідюк, І. В. Баклан, Я. І. Баклан, Л. О. Коршевнюк, В. І. Літвіненко. – К. : ЕКМО, 2004. – 120 с.
5. Воркут Т.А., Луцкай Ю.В., Харута В.С., Чечет А.М. Стратегічне управління проектами логістичного аутсорсингу: монографія / Київ: міленіум. 2021. – 159 с.

6. Guaranteed-adaptive control of agriculture machines working processes and its efficiency / Kravchuk V.I., Baranov G.L., Salai Karnil, Gaidai T.V., Komisarenko O.S. Journal of advanced research in dynamical and control systems. (2020).
7. Дмитриченко М.Ф., Харченко А.М., Мороз Т.М. Система діагностування стану автомобільних доріг як засіб стратегічного планування експлуатаційного утримання. *Erbe der europäischen Wissenschaft / Heritage of European science*, Germany, 2021. P. 224-258.
8. European Commission «Digital Agenda for Europe. Available online at: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/>.
9. Інформатизація агропромислового комплексу із застосуванням розгалужених сервісів: стан і перспективи розвитку / В. Кравчук, Г. Баранов, О. Комісаренко // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Зб. Наук. Праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке, 2019. Вип. 24 (38). С. 202-213.
10. Stalski, W. (2021) 'A new approach to creation of an artificial intellect and method of its implementation', *Journal of Artificial General Intelligence*, 12(1), pp. 87–110. doi:10.2478/jagi-2021-0004.
11. Hernandez, P. (2017) 'Worldwide Data Will Surge to 163 Zettabytes by 2025', *Enterprise Storage Forum*. Available at: <https://www.enterprisestorageforum.com/backup-recovery/worldwide-data-will-surge-to-163-zettabytes-by-2025.html> (Accessed: 4 April 2023).
12. Zadeh, L.A., Tadayon, S. and Tadayon, B. (2018) 'System and method for extremely efficient image and pattern recognition and artificial intelligence platform', *US Patent Application 20180204111 A1*. Available at: <https://patents.justia.com/patent/20180204111> (Accessed: 1 June 2023).
13. Alammari, J. and Grootendorst, M. (2024) *Hands-On Large Language Models*. Available at: <https://www.example.com> (Accessed: 1 June 2023).
14. Strannegård, C., Xu, W., Engsner, N. and Endler, J. A. (2020) 'Combining evolution and learning in computational ecosystems', *Journal of Artificial General Intelligence*, 11(1), pp. 1–37. doi:10.2478/jagi-2020-0001.
15. Вірченко, Н. О. and Кравчук, М. П. (2014) *Енциклопедія Сучасної України*. Київ: НАН України, НТШ, ІІЦ, Інститут енциклопедичних досліджень.
16. Adamson, P. (2019) 'American history at the foreign office: Exporting the silent epic Western', *Film History*, 31(2), pp. 32–59. doi:10.2979/filmhistory.31.2.02.
17. Turing, A. M. (1950) 'Computing machinery and intelligence', *Mind*, 59(236), pp. 433–460. Available at: <https://academic.oup.com/mind/article/LIX/236/433/986238> (Accessed: 1 June 2023).
18. ChatGPT – The impact of Large Language Models on Law Enforcement. (2023). Luxembourg: Publications Office of the European Union. Available at: <https://www.europol.europa.eu/publications-events/publications/chatgpt-impact-of-large-language-models-law-enforcement> (Accessed: 1 June 2023).
19. Організація об'єднаних націй [Електронний ресурс]/ Режим доступу: <https://mfa.gov.ua/mizhnarodni-vidnosini/organizaciya-obyednanih-nacij>.
20. Hernandez, P. (2017) 'Worldwide Data Will Surge to 163 Zettabytes by 2025', *Enterprise Storage Forum*, 4 April. Available at: <https://www.enterprisestorageforum.com/backup-recovery/worldwide-data-will-surge-to-163-zettabytes-by-2025.html> (Accessed: 1 June 2023).
21. Комісаренко О.С., Баранов Г.Л., Мазур В.С. Іноваційна цифровізація інформаційних інтелектуальних технологій для розвитку поточкових мереж та комунікаційних систем / XI Міжнародна науково-практична конференція «MODERN RESEARCH IN SCIENCE AND EDUCATION», 27-29.06.2024, Чикаго, США. р.117-125.
22. Баранов Г.Л., Комісаренко О.С., Мазур В.С. Проблемні запити життя сучасної освіти та науки майбутньої геоекоосфери та відгуки парадигмальної самоорганізації промислових виробництв / XI Міжнародна науково-практична конференція «CURRENT CHALLENGES OF SCIENCE AND EDUCATION», 1-3.07.2024, Берлін, Німеччина. р.33-38.
23. Komisarenko O.S., Baranov G.L., Bedko I.O., Mazur V.S. Problems of linguistic models growing volumes and innovative methods digitalization information intellectual technologies / *Modern engineering and innovative technologies*. Issue 33 / Part 1. 2024. pp.55-65.

24. Інфологічне моделювання процесів створення функціональних матеріалів [Текст] : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.06 – інформаційні технології / Комісаренко Олена Сергіївна. – К. : НТУ, 2020. – 283с.

25. Патент № 127695 України, МПК G 09 В 9/00. Комплексний тренажер оператора повітряного судна / Баранов Г.Л., Горішна І.Я., Габрук Р.А.- № u201807004; заявл. 22.06.2018; опубл. 10.08.2018. Бюл. № 15/2018.

REFERENCES

1. Baranov H.L. Strukturnoe modelyrovanye slozhnykh dynamicheskikh system / H.L. Baranov, A.V. Makarov – K.: Naukova dumka, 1986. – 272 s.
2. Baranov V.L. Systemoanalohovoe y kvazyanalohovoe modelyrovanye / V.L. Baranov, H.L. Baranov //Elektron. modelyrovanye. – 1994. – №4 (16). – S. 9-16.
3. Bortyny de R.O., Kuznetsov P.H. Mnozhestvennost heometryi y mnozhestvennost fyzyk // Modelyrovanye dynamicheskikh system. – Briansk, 1974. – S. 18-29.
4. Bidiuk P. I. Modeliuvannia ta prohnozuvannia neliniinykh dynamichnykh protsesiv / P. I. Bidiuk, I. V. Baklan, Ya. I. Baklan, L. O. Korshevniuk, V. I. Litvinenko. – K. : EKMO, 2004. – 120 c.
5. Vorkut T.A., Lushchai Yu.V., Kharuta V.S., Chechet A.M. Stratehichne upravlinnia proektamy lohystychnoho autsorsynhu: monohrafiia / Kyiv: milenium. 2021. – 159 s.
6. Guaranteed-adaptive control of agriculture machines working processes and its efficiency / Kravchuk V.I. Baranov G.L., Salai Karnil, Gaidai T.V., Komisarenko O.S. Journal of advanced reserch sn dynamical and control systems. (2020).
7. Dmytrychenko M.F., Kharchenko A.M., Moroz T.M. Systema diahnostuvannia stanu avtomobilnykh dorih yak zasib stratehichnoho planuvannia ekspluatatsiinoho utrymannia. Erbe der europaischen Wissenschaft / Heritage of European science, Germany, 2021. P. 224-258.
8. European Commission «Digital Agenda for Europe. Available online at:// <https://ec.europa.eu/digital-single-market/>.
9. Informatyzatsiia ahropromysloвого комплексу iz zastosuvanniam rozghaluzhenykh servisiv: stan i perspektyvy rozvytku / V. Kravchuk, H. Baranov, O. Komisarenko // Tekhniko-tekhnohichni aspekty rozvytku ta vyprobuвання novoi tekhniki i tekhnolohii dlia silskoho hospodaostva Ukrainy: Zb. Nauk. Prats UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. Doslidnytske, 2019. Vyp. 24 (38). S. 202-213.
10. Stalski, W. (2021) ‘A new approach to creation of an artificial intellect and method of its implementation, Journal of Artificial General Intelligence, 12(1), pp. 87–110. doi:10.2478/jagi-2021-0004.
11. Hernandez, P. (2017) ‘Worldwide Data Will Surge to 163 Zettabytes by 2025, Enterprise Storage Forum. Available at: <https://www.enterprisestorageforum.com/backup-recovery/worldwide-data-will-surge-to-163-zettabytes-by-2025.html> (Accessed: 4 April 2023).
12. Zadeh, L.A., Tadayon, S. and Tadayon, B. (2018) ‘System and method for extremely efficient image and pattern recognition and artificial intelligence platform, US Patent Application 20180204111 A1. Available at: <https://patents.justia.com/patent/20180204111> (Accessed: 1 June 2023).
13. Alammari, J. and Grootendorst, M. (2024) Hands-On Large Language Models. Available at: <https://www.example.com> (Accessed: 1 June 2023).
14. Strannegård, C., Xu, W., Engsner, N. and Endler, J. A. (2020) ‘Combining evolution and learning in computational ecosystems, Journal of Artificial General Intelligence, 11(1), pp. 1–37. doi:10.2478/jagi-2020-0001.
15. Virchenko, N. O. and Kravchuk, M. P. (2014) Entsiklopediia Suchasnoi Ukrainy. Kyiv: NAN Ukrainy, NTSh, IITs, Instytut entsyklopedychnykh doslidzhen.
16. Adamson, P. (2019) ‘American history at the foreign office: Exporting the silent epic Western, Film History, 31(2), pp. 32–59. doi:10.2979/filmhistory.31.2.02.
17. Turing, A. M. (1950) ‘Computing machinery and intelligence, Mind, 59(236), pp. 433–460. Available at: <https://academic.oup.com/mind/article/LIX/236/433/986238> (Accessed: 1 June 2023).
18. ChatGPT – The impact of Large Language Models on Law Enforcement. (2023). Luxembourg: Publications Office of the European Union. Available at: <https://www.europol.europa.eu/publications-events/publications/chatgpt-impact-of-large-language-models-law-enforcement> (Accessed: 1 June 2023).

19. Orhanizatsiia obiednanykh natsii [Elektronnyi resurs]/ Rezhym dostupu: <https://www.un.org/ru/>.
20. Hernandez, P. (2017) 'Worldwide Data Will Surge to 163 Zettabytes by 2025, Enterprise Storage Forum, 4 April. Available at: <https://www.enterprisestorageforum.com/backup-recovery/worldwide-data-will-surge-to-163-zettabytes-by-2025.html> (Accessed: 1 June 2023).
21. Komisarenko O.S., Baranov H.L., Mazur V.S. Inovatsiina tsyfrovizatsiia informatsiinykh intelektualnykh tekhnolohii dlia rozvytku potokovykh merezh ta komunikatsiinykh system / XI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «MODERN RESEARCH IN SCIENCE AND EDUCATION», 27-29.06.2024, Chykhah, SShA. p.117-125.
22. Baranov H.L., Komisarenko O.S., Mazur V.S. Problemni zapyty zhyttia suchasnoi osvity ta nauky maibutnoi heonoosfery ta vidhuky paradyhmalnoi samoorhanizatsii promyslovykh vyrobnytstv / XI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «CURRENT CHALLENGES OF SCIENCE AND EDUCATION», 1-3.07.2024, Berlin, Nimechchyna. p.33-38.
23. Komisarenko O.S., Baranov G.L., Bedko I.O., Mazur V.S. Problems of linguistic models growing volumes and innovative methods digitalization information intellectual technologies / Modern engineering and innovative technologies. Issue 33 / Part 1. 2024. pp.55-65.
24. Infolohichne modeliuвання protsesiv stvorennia funktsionalnykh materialiv [Tekst] : dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.13.06 – informatsiini tekhnolohii / Komisarenko Olena Serhiivna. – K. : NTU, 2020. – 283s.
25. Patent № 127695 Ukrainy, MPK G 09 B 9/00. Kompleksnyi trenazher operatora povitrianoho sudna / Baranov H.L., Horishna I.Ia., Habruk R.A.- № u201807004; zaiavl. 22.06.2018; opubl. 10.08.2018. Biul. № 15/2018.

РЕФЕРАТ

Комісаренко О.С. Символьна цифровізація технологій інтелектуального транспорту полієргатичних виробництв геонаосфери / О.С. Комісаренко, Г.Л. Баранов, Д.В. Метельська, О.К. Войденко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Україна разом з провідними державами світу активно забезпечує розвиток інтелектуальних транспортних систем. Цільові етапи на 2030-2050 роки спрямовані до майбутніх прогнозних станів інтелектуальних транспортних систем. Цільові ресурсоефективні техніко-технологічні рішення у вигляді очікуваних послуг, продуктів, товарів за новими комплексними (регламентами, стандартами, критеріями безпеки, функціональної стійкості, живучості, екологічної економіки) неможливі без суттєвого оновлення інтелектуальних транспортних систем. Взаємодія множин об'єктів складних динамічних систем з гетерогенними контактами середовища обумовлює парадигму двоїстості прямих та зворотних, причинно-наслідкових відношень. Символьна цифровізація технологій інтелектуального транспорту завчасно, якісно, повно, локально точно забезпечує комплексне моделювання об'єктів керованої дії та впливів факторів природного середовища. Предикативна форма даних для розв'язків задач практики визначає аксіологічну основу цифровізованої бази знань. Визначальні логічні описи незмінні й вирішальні для різних галузей людської діяльності за потреб еволюційного розвитку самоорганізації, обізнаності, як діяти при надзвичайних транспортних подіях.

Стаття присвячена розвитку технологій цифровізації інтелектуальних інформаційних технологій для моделювання інтеграційних перехідних процесів, що за умов ризиків та невизначеності факторів нестаціонарного природного середовища синергетично впливають на рівень безпеки дорожнього руху для всіх видів транспортних засобів.

Формалізовано математичний опис режимів функціонування бортових інформаційно-керуючих комплексів з застосуванням для маневреного руху електронних навігаційних карт разом з довідниковими інформаторами на швидке реагування.

Обґрунтовано сутність, особливості та специфіку функцій оперативних дій у ситуативних режимах динамічної взаємодії водія з бортовими інформаційними керуючими комплексами, які упереджують маневри запобігання аварійних пригод, що можливі у майбутньому.

Інформаційно-аналітичні засоби цифровізованої технології забезпечують достовірність багатокритеріальних оцінок інтервалу безпечного руху згідно трансверсальної кривої уходу від лиха

гетерогенної взаємодії. Єдині методи моделювання просторового розділення власних траєкторій кожним бортовим інформаційним керуючим комплексом різних транспортних засобів гарантує активне ухилення від зіткнень або проходження заборонених зон шляхом синтезу гарантованого адаптивного управління рівнями безпеки у межах нестационарних потоків майбутньої інфраструктури європейського союзу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СИМВОЛЬНА ЦИФРОВІЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНІ ПРОДУКТИ, ЕРГАТИЧНА ДІЯЛЬНІСТЬ, БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ, МАЙБУТНІЙ ТРАНСПОРТ.

ABSTRACT

Komisarenko O.S., Baranov G.L., Metelska D.V., Voydenko O.K. Symbolic digitalization of technologies for intelligent transport of polyergatic production of the geosphere. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

Ukraine, together with the world's leading countries, is actively supporting the development of intelligent transport systems. The target stages for 2030-2050 are aimed at the future projected states of intelligent transport systems. Targeted resource-efficient technical and technological solutions in the form of expected services, products, goods according to new complex (regulations, standards, safety criteria, functional stability, survivability, ecological economy) are impossible without a significant upgrade of intelligent transport systems. The interaction of multiple objects of complex dynamic systems with heterogeneous environmental contacts determines the paradigm of duality of direct and reverse, cause-and-effect relations. The symbolic digitalization of intelligent transport technologies provides timely, high-quality, complete, locally accurate complex modeling of controlled objects and the effects of environmental factors. Predictive data form for solving practical problems determines the axiological basis of the digitalized knowledge base. The defining logical descriptions are unchanged and crucial for various fields of human activity in the needs of evolutionary development of self-organization, awareness of how to act in case of emergency transport events.

The article is devoted to the development of technologies for the digitalization of intelligent information technologies for modeling integration transitions, which, under conditions of risks and uncertainty of factors of the non-stationary natural environment, synergistically affect the level of road safety for all types of vehicles.

A mathematical description of the modes of functioning of onboard information and control systems with the use of electronic navigation maps for maneuvering traffic together with reference information for rapid response is formalized.

The essence, peculiarity and specificity of the functions of operational actions in situational modes of dynamic interaction between the driver and on-board information control systems that prevent maneuvers to prevent accidents that may occur in the future are substantiated.

Information and analytical tools of digitalized technology ensure the reliability of multicriteria estimates of the safe driving interval according to the transversal disaster avoidance curve of heterogeneous interaction. Unified methods of modeling the spatial separation of own trajectories by each onboard information control system of different vehicles guarantees active avoidance of collisions or passage of prohibited zones by synthesizing guaranteed adaptive control of safety levels within the non-stationary flows of the future infrastructure of the European Union.

KEY WORDS: SYMBOLIC DIGITALIZATION, COMPUTER PRODUCTS, ERGATIC ACTIVITY, MULTICRITERIA MANAGEMENT, FUTURE TRANSPORT.

АВТОРИ:

Олена Сергіївна Комісаренко, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, e-mail: olenakomisarenko@ukr.net, тел. +380974638845, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 347а. orcid.org/0000-0002-7436-6473

Георгій Леонідович Баранов, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри інформаційних систем і технологій, тел. 280-70-66, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 347а. orcid.org/0000-0003-2494-8771

Дар'я Вікторівна Метельська, Національний транспортний університет, аспірант кафедри інформаційних систем і технологій, e-mail: metelskadasha@gmail.com, тел. +380962465632, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 347а, orcid.org/0009-0002-2804-3101

Олексій Костянтинович Войденко, Національний транспортний університет, аспірант кафедри інформаційних систем і технологій, e-mail: mrjerichoo@gmail.com, тел. +380937451998, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 347а, orcid.org/0000-0003-0818-6172

AUTHOR:

Olena Serhiivna Komisarenko, Ph.D., associate professor, National Transport University, associate professor of the department of information systems and technologies, e-mail: olenakomisarenko@ukr.net, tel. +380974638845, Ukraine, 01010, Kyiv, 1, M. Omelianovycha-Pavlenka Str. k. 347a. orcid.org/0000-0002-7436-6473

Georhii Leonidovych Baranov, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, tel. 280-70-66, Ukraine, 01010, Kyiv, street. M. Omelianovycha-Pavlenka Str, 1, k. 347a. orcid.org/0000-0003-2494-8771

Daria Viktorivna Metelska, National Transport University, Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, e-mail: metelskadasha@gmail.com, tel. +380962465632, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovich-Pavlenko Str, 1, of. 347a, orcid.org/0009-0002-2804-3101

Oleksii Kostiantynovych Voidenko, National Transport University, Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, e-mail: mrjerichoo@gmail.com, tel. +380937451998, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovich-Pavlenko Str, 1, of. 347a, orcid.org/0000-0003-0818-6172.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Алі Аль-Амморі, доктор технічних наук, професор, Академік Транспортної академії України. Національний транспортний університет, професор кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, Київ, Україна.

Олена Олександрівна Гриненко, кандидат технічних наук, доцент, Національний авіаційний університет, В.о завідувача кафедри інженерії програмного забезпечення, Київ, Україна.

REVIEWER:

Ali Al-Ammori, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Transport Academy of Ukraine. National Transport University, Professor of the Department of Information and Analytical Activities and Information Security, Kyiv, Ukraine.

Olena Oleksandrivna Grinenko, PhD, Associate Professor, National Aviation University, Acting Head of the Department of Software Engineering, Kyiv, Ukraine..

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБЕРНЕНОГО РОЗРАХУНКУ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ВИПРОБУВАНЬ FFWD

Коршак А.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна,
alinakorshak18@gmail.com, orcid.org/0009-0003-3100-1137

ANALYSIS OF METHODS FOR INVERSE CALCULATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY OF AIRPORT PAVEMENT BASED ON FFWD TESTS

Korshak A.V., National Transport University, Kyiv, Ukraine, alinakorshak18@gmail.com,
orcid.org/0009-0003-3100-1137

Постановка проблеми.

Сучасна інфраструктура аеропортів вимагає постійного моніторингу технічного стану покриттів елементів аеродромів. Інтенсивність руху та навантаги від повітряних суден призводять до утворення дефектів та зниження несучої здатності конструкції [1]. Забезпечення належного експлуатаційного стану елементів аеродромів є одним з основних завдань утримання та експлуатації існуючих аеродромів. Передчасне виявлення таких процесів дає змогу ефективно планувати ремонтні роботи, оптимізувати витрати та продовжити термін експлуатації.

Одним з найпоширеніших способів діагностики технічного стану є дефлектометричні випробування з використанням Fast Falling Weight Deflectometer (FFWD). Суть методу полягає у прикладанні короткочасного імпульсного навантаження до поверхні покриття та вимірюванні прогинів у ряді точок на різних відстанях від центру навантаження. За так званою «чашею прогинів» можна оцінити реакцію конструкції.

Проте вимірювання прогинів не дає повної картини оцінювання існуючого технічного стану. Для прийняття інженерних рішень необхідно знати інформацію про характеристики існуючих шарів (модулі пружності та товщини), за якими визначають несучу здатність покриття. Визначення модулів пружності на основі вимірюваних прогинів є оберненою задачею механіки шаруватих систем, що має складний, неоднозначний характер і потребує застосування спеціальних методів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Обернений розрахунок модуля пружності аеродромних покриттів на основі результатів випробувань FFWD є важливим, але складним завданням, що передбачає оцінку фізико-механічних властивостей шарів покриття на основі вимірюваних прогинів від прикладеної навантаги. Зазвичай використовуються багат шарові моделі, що дають змогу за допомогою оптимізаційних алгоритмів підібрати модулі пружності шарів так, щоб змодельовані значення прогинів відповідали експериментальним даним. Однак такі моделі мають високу залежність від початкових заданих параметрів та мають обмеження з урахування нелінійних та часових ефектів, характерних для асфальтобетону, що призводить до суттєвих похибок під час розрахунку модулів [2, 3]. З метою більш точного моделювання матеріалів із в'язкоеластичними характеристиками застосовують математичні методи з урахуванням часової залежності деформацій. Застосування оптимізаційних методів дозволяє отримати більш реальні розрахунки модулів, враховуючи реальні характеристики матеріалів, що підтверджується похибкою до 15 % у порівнянні з класичними методами [4,5]. У сучасних дослідженнях все частіше використовуються методи швидкого визначення математичного або технічного значення без точних технічних обчислень (евристичні методи), які забезпечують ефективний пошук найкращого результату у складних багатовимірних параметрах і працюють добре навіть, якщо вихідні дані неточні [6]. Чисельні методи, зокрема 3D-моделювання на основі методу скінченних елементів, дозволяють врахувати геометричні параметри покриттів, наявність дефектів, температурні коливання та нелінійні властивості матеріалів. Це значно підвищує точність оберненого розрахунку модулів [7]. Проте такі методи є більш складними у розрахунку і вимагають точних вхідних даних. Отже, сучасні методи оберненого розрахунку поєднують класичні теоретичні моделі із новими алгоритмами оптимізації та чисельними моделюваннями. Це сприяє підвищенню надійності та точності визначення механічних характеристик аеродромних покриттів на основі випробувань FFWD.

Мета роботи. Аналізування існуючих методів оберненого розрахунку модуля пружності аеродромних покриттів за даними випробувань FFWД з оцінюванням їхніх переваг та недоліків.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Аеродромне покриття – це багатошарова конструкція. Під дією імпульсного навантаження F , прикладеного через жорстку круглу плиту, у вимірювальних точках на відстані від центру навантаження фіксуються прогини D , на підставі яких формується чаша прогинів (рис. 1).

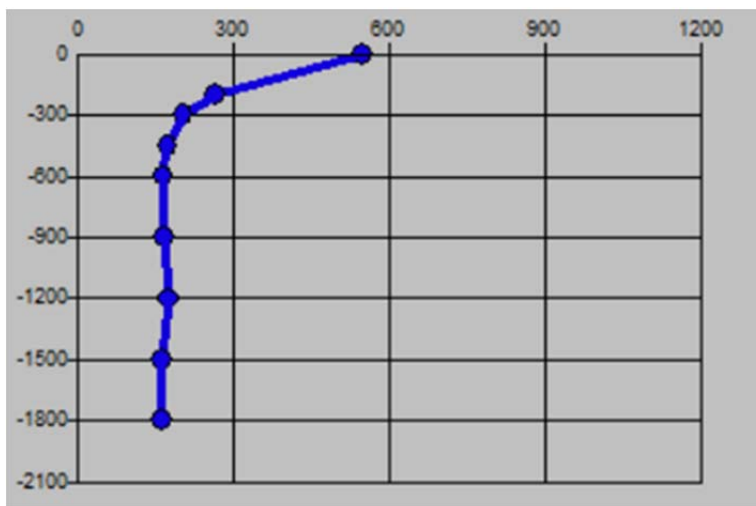


Рисунок 1 – «Чаша прогинів»
Figure 1 – «Bowl of deflections»

Прямий розрахунок полягає у визначенні прогинів за відомих модулів пружності E , товщин h та коефіцієнтів Пуассона ν за допомогою класичних розрахунків для багатошарових конструкцій.

Процес оберненого розрахунку модулів пружності покриттів – це складний процес, оскільки модулі кожного шару конструкції та їх взаємодія впливають на значення загального прогину, вимірюного на поверхні. За роки досліджень розроблено багато підходів та методів, а також програм для оберненого розрахунку шарів покриття та реакції земляного полотна.

Обернений розрахунок – це метод визначення характеристик шарів покриття, що відрізняється від прямого розрахунку. Його суть у використанні даних про деформації для визначення модулів пружності кожного з існуючих шарів. Цей метод полягає у визначенні характеристик конструкції модуля пружності E та товщини шару h , для якого розраховані прогини $D_{i,calc}$ максимально близькі до експериментальних даних $D_{i,exp}$.

Такий розрахунок використовує значення вимірних параметрів (деформацій, навантажень, переміщень тощо) для визначення невідомих властивостей матеріалів, таких як модуль пружності. Цей метод застосовується, коли безпосереднє вимірювання модуля пружності складне або неможливе.

Обернений розрахунок передбачає:

- моделювання поведінки матеріалу – вибір відповідної математичної моделі для опису його властивостей;
- аналіз експериментальних даних – збирання даних про напруження, деформації тощо;
- оптимізація або інверсія – методи для пошуку параметрів моделі, які найкраще відповідають експериментальним даним.

Алгоритм розрахунку:

- збір даних про прогини, навантаження та геометричні параметри;
- вибір моделі/програмного забезпечення для проведення розрахунку;
- визначення основних даних шарів покриття: модулів, коефіцієнтів, товщин;
- мінімізація невідповідностей та аналізування отриманих даних.

Важливим є точний збір даних та вибір адекватної теоретичної моделі.

Необхідними даними для розрахунку є: деформації – вимірювання прогинів і дефектацій (тріщиноутворення); товщина шарів – георадарне сканування, буріння кернів та отримання даних з проектої документації; навантаження – інтенсивність руху та осьові навантаження; інформація про кліматичні умови проведення випробувань – температура, опади, глибина промерзання.

Наявність дефектів, таких як тріщини, слабкі зони, неоднорідності матеріалу чи пористості, нерівномірність товщини шарів, часто знижує точність методів. Навіть поперечні тріщини можуть впливати на результати: модулі асфальтобетонного шару можуть бути переоцінені, а модулі основи – недооцінені. Різниця може сягати від – 68 % до +23 % для асфальтобетону і – 57 % до +36 % для основи.

Неоднорідність шарів чи матеріалів ускладнює процес визначення стандартними методами, чи змінився модуль пружності, чи лише змінилася товщина або ущільнення.

Існуючі методи вимірювання деформацій:

- геодезичні: нівелювання та GPS-вимірювання;
- механічні: Балка Бенкельмана, дефлектометр падаючого навантаження;
- безконтактні: лазерне сканування та фотограмметрія.

Дефлектометричні методи: Falling Weight Deflectometer (FFWD) – метод неруйнівного випробування з імітуючим навантаженням від 7 до 150 кН; Heavy Weight Deflectometer (HWD) застосовується для аеродромів, імітує навантаження від літака до 250 кН; Dynamic Deflection (Dynaflect) (рис. 2).

Недеструктивні методи: ультразвуковий метод; ударно-імпульсний метод.

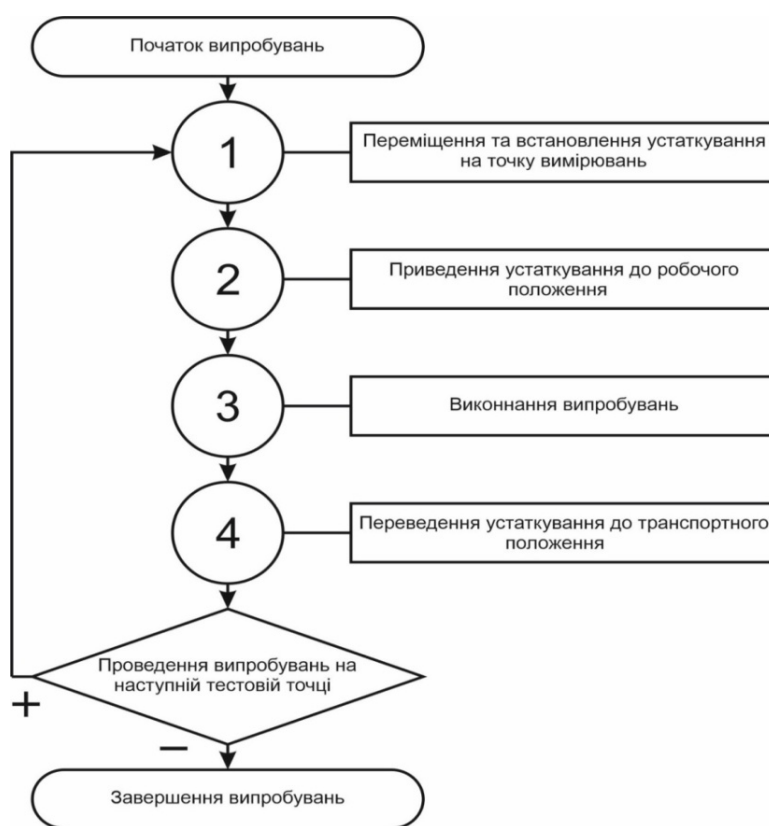


Рисунок 2 – Схема проведення вимірювань динамічного модуля пружності

Figure 2 – Scheme of measurements of dynamic elastic modulus

Методи статичних (вимірювання прогинів від статичного навантаження) (рис. 3) та динамічних навантажень (рис. 4) є надійними і точними для оцінювання реакції покриття в реальних умовах експлуатації. Вони враховують як постійні (статичні) навантаження, так і змінні (динамічні) навантаження. Проте проведення таких випробувань потребує високоточного обладнання, а інтерпретація результатів ускладнюється наявністю нелінійних ефектів.

З рисунків 3 та 4 можна зробити висновок, що динамічні випробування є ефективнішими, оскільки відображають поведінку покриття в реальних умовах експлуатації з урахуванням змінних навантажень, швидкості реакції та інших факторів, які не можна повністю змодельовати під час статистичних випробувань. Динамічні випробування дають більш точні та надійні результати, що важливо для оцінювання довговічності, безпеки та ефективності конструкцій.

Вибір методу залежить від конкретних умов випробування, необхідної точності та доступного обладнання.

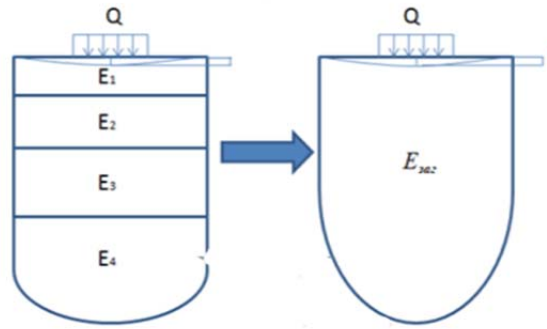


Рисунок 3 – Схема статистичних вимірювань
Figure 3 – Statistical measurement scheme

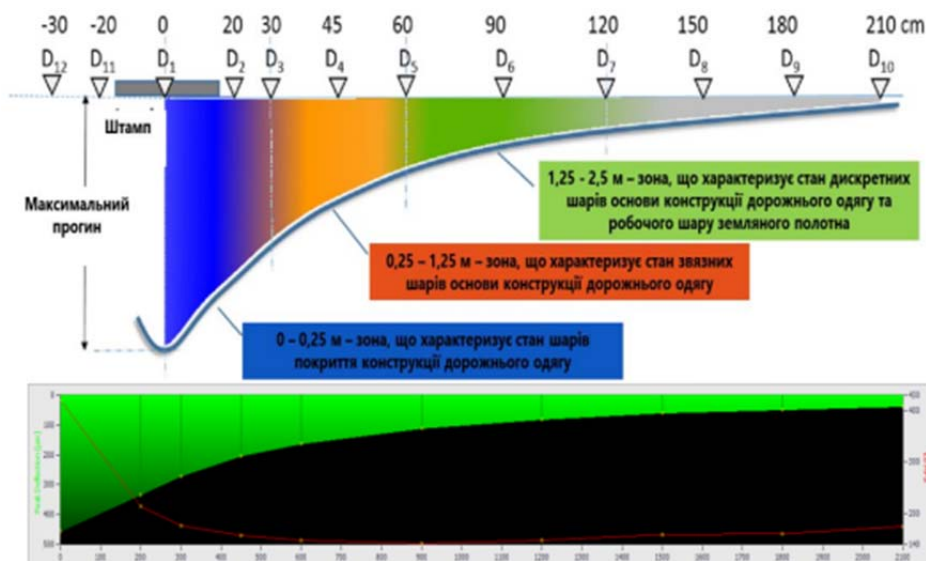


Рисунок 4 – Схема динамічних вимірювань
Figure 4 – Dynamic measurement scheme

Методи оберненого розрахунку дозволяють визначити характеристики матеріалів без руйнування.

Один з найпоширеніших методів – метод з використанням експериментальних деформацій. Його суть полягає у вимірюваннях деформацій конструкцій під впливом відомих навантажень з подальшим аналізуванням отриманих даних для оберненого розрахунку характеристик матеріалів. Такий метод дозволяє оцінити поведінку конструкції в реальних умовах експлуатації та є основою для створення числових моделей.

Метод скінченних елементів (МСЕ) – метод, який передбачає дискретизація конструкції (поділ на невеликі частини) для чисельного розв'язання. Є вагомим інструментом для моделювання реакції конструкції від навантажень, що дозволяє отримати детальну картину деформацій та напружень у різних частинах покриття. Застосування МСЕ для моделювання аеродромних покриттів дозволяє відтворити просторову структуру, фізико-механічні властивості матеріалів і геометричні параметри шарів конструкції.

Метод інверсії числової моделі передбачає використання результатів чисельного моделювання для визначення таких параметрів моделі (насамперед модуля пружності), при яких розрахункові значення максимально відповідають експериментальним. Цей метод включає створення обчислювальної моделі конструкції з припущенням щодо властивостей матеріалів та поступовим уточненням властивостей шляхом порівняння з результатами випробувань. Інверсійні методи ефективні для аналізу жорстких конструкцій, де класичні аналітичні методи не дають необхідної точності.

Метод моделювання на основі попередньо відомих властивостей використовує заздалегідь отримані експериментальні дані як вихідні параметри для розрахунку, наприклад, лабораторні характеристики матеріалів. У цьому методі модуль пружності визначається з урахуванням

теоретичних моделей, що описують механіку поведінки матеріалів, таких як рівняння теорії пружності або в'язкопружності. Такий метод доцільно застосовувати у випадках, коли достовірно відомі характеристики матеріалів існуючого покриття.

Метод оптимізації параметрів передбачає застосування алгоритмів чисельної оптимізації для підбору значень фізико-механічних характеристик, які мінімізують різницю між розрахунковими та експериментальними даними. У цьому методі модуль пружності розглядається як змінний параметр, що поступово коригується для зменшення похибки. Оптимізаційні методи можуть здійснюватися, як за допомогою класичних методів (методи найменших квадратів, градієнтний спуск), так і на сучасних евристичних підходах, що підвищує точність розрахунків у складних умовах.

Метод багат шарових лінійно-еластичних моделей є простим і досить швидким, тому його можна використовувати для масових та широких оцінювань. Однак він не враховує динамічні навантаження, демпфування та в'язкоеластичну реакцію матеріалів. Через це можуть виникати похибки для жорстких або в'язкоеластичних конструкцій. Згідно з дослідження [8], модулі, що обчислені за таким методом, суттєво відрізняються від лабораторних значень.

Переваги: простота у реалізації та розумінні, низька вартість, широке застосування, наявність великої кількості програмних засобів.

Недоліки:

- не врахування динамічних навантажень: метод не звертає увагу на тривалість удару, хвильові процеси та інерційні явища, що суттєво важливо для асфальтобетонних шарів;
- висока залежність від вихідних даних (товщини шарів та інших параметрів, які точно відомі);
- неоднозначність рішень: різні набори модулів можуть давати схожі часті прогинів.

Оптимізаційні алгоритми дозволяють долати проблеми локальних мінімумів та невідомості початкових даних. Наприклад, у дослідженні [10] було показано, що такі методи забезпечують кращу якість підгонки та дозволяють одночасно визначати товщини шарів. Однак їх застосування може бути складним через: велику кількість параметрів, потребу у значній кількості ітерацій, ризик навчання у випадку використання штучних нейронних мереж [11].

Хвильові методи та аналізування часових історій підвищують інформаційність під час виявлення резонансних і динамічних явищ. У дослідження [12] показано, що реакції покриття можуть мати резонансні частоти, які не враховують класичні методи. Такий метод дозволяє покращити відповідність змодельованих і вимірних даних.

Динамічне моделювання дає змогу точніше відтворювати реальні умови краще, враховуючи інерційні властивості, демпфування основи та часові ефекти. Проєкт [9] показав, що динамічна модель може бути не лише ефективною, а й швидкою за умови верифікації параметрів на основі польових випробувань.

Такий метод має низку переваг: швидкість та точність обчислень; неруйнівний метод випробувань; можливість отримати модулі пружності кожного шару; менше спотворення результатів через ігнорування динамічних явищ, особливо при ударному навантаженні.

Але також є недоліки: складність оброблення отриманих даних та проведення розрахунків: складність калібрування: демпфування, градієнти по глибині, температурні залежності, неоднорідності матеріалів; висока залежність від температури; висока вартість обладнання для проведення випробувань.

На сьогодні існує багато програмних забезпечень (ПЗ) для проведення таких розрахунків, основні з яких наведено у табл. 1. Вони мають високу точність та широке застосування.

У роботі [2] було порівняно три поширені програми (BAKFAA, MODULUS, EVERCALC) для оберненого розрахунку модулів пружності для аеродромних покриттів. Результати значно залежать від початкового значення модуля пружності. Програма EVERCALC показала точність порівняно з BAKFAA і MODULUS.

Використання методів оберненого розрахунку на основі даних FFWD дає змогу точно визначити необхідні параметри для подальшого планування ремонтних робіт або для вибору робіт з відновлення покриття.

Обернений розрахунок дозволяє провести:

- оцінювання фізичних та механічних характеристик існуючих покриттів (модуль пружності покриття та окремих шарів конструкції, деформацій та вплив на довговічність покриття, визначення товщини шарів);

- прогнозування довговічності та життєвого циклу, що дозволяє визначити через скільки років конструкція може зазнати критичних пошкоджень, а також оцінити необхідні витрати на його обслуговування в майбутньому;

Таблиця 1 – Основні ПЗ для оберненого розрахунку
Table 1 – Basic software for inverse calculation

№ ч.ч.	Назва ПЗ	Прямий метод розрахунку	Обернений метод розрахунку	Схема конвергенції
1	BAKFAA	Багатошарова пружності теорія	Ітеративний	Сума квадратів абсолютної похибки
2	DIPLOBACK	Кінцевий елемент	База даних	
3	ELMOD®	Еквівалентна товщина/скінченний елемент	Ітеративний	Відносна похибка
4	ILLI-BACK	Закрита форма	Закрита форма	
5	MICHBACK©	Багатошарова пружності теорія	Метод РафсонаНьютона	Найменших квадратів
6	WESDEF	Багатошарова пружності теорія	Ітеративний	Сума квадратів абсолютної похибки
7	PCASE	Багатошарова пружності теорія	Ітеративний	Сума квадратів абсолютної похибки

– проектування та оптимізація покриттів (можна врахувати дані про навантаження та обрати найкращу товщину і склад матеріалів для кожного шару);

– аналізування пошкоджень покриття та їх ремонт, що дозволяє визначити, потребу у локальному ремонті чи більш масштабному відновленні покриття;

– оцінювання ефективності різних типів покриттів;

– управління обслуговуванням і планування. Можна використовувати для оцінки загального стану і складання плану обслуговування, що дозволяє зменшити витрати на ремонт і продовжити термін експлуатації.

Переваги оберненого розрахунку: можливість отримання точних результатів при наявності обмежених експериментальних даних, використання для різноманітних умов навантаження та експлуатації, можливість адаптації методів до конкретних типів покриттів, зниження вартості проектування завдяки оптимізації матеріалів та конструкцій, швидкість оброблення даних та призначення ремонтних робіт.

Обмеження та недоліки оберненого розрахунку: потреба в точних експериментальних даних для успішного застосування методу, залежність від якості моделі та вихідних даних, обмеження в точності результатів при неправильному виборі методів оптимізації або числових моделей, складність у виборі оптимальних математичних моделей для складних матеріалів, висока обчислювальна складність для великих або складних моделей.

Рекомендації та практичне застосування.

Для покриттів з невеликою товщиною шарів (наприклад, гнучких покриттів з асфальтобетону) може бути достатньо класичних методів, особливо коли доступні якісні дані FFWD і немає вимог щодо точності.

Якщо покриття має більшу товщину або має жорсткий тип конструкції, або ж потрібно оцінити реакцію під важким літаком, слід застосовувати динамічні методи, які враховують демпфування і інерційних ефектів.

Оптимізаційні методи корисні, за умови обмеженої інформації або, якщо класичні моделі дають неоднозначні результати. Необхідно мати достатню кількість даних та обмежень під час використання даного методу.

Хвильові методи та аналіз часових історій деформацій рекомендовані, якщо є змога вимірювати часовий відгук, а не лише максимальні прогини, адже це дає додаткову інформацію і підвищує точність.

Отримані модулі пружності потрібно перевіряти лабораторними тестуваннями або порівнювати з результатом реальних випробувань для перевіряння точності.

Висновки.

Обернений розрахунок модуля пружності є важливим методом для оцінювання стану та залишкового терміну експлуатації аеродромних покриттів. Класичні методи багатошарової конструкції залишаються актуальними, тому що вони простіші та швидші у застосуванні, проте вони мають обмеження у випадках жорстких або конструкцій з великою товщиною. Сучасні методи

дозволяють значно підвищити точність, але потребують більше ресурсів, даних і ретельного калібрування.

Вибір методу залежить від властивостей матеріалів, структури конструкції, наявності даних (FFWD), можливості вимірювати часову історію та необхідній точності. У майбутньому слід спрямовувати дослідження на стандартизацію методу динамічного оберненого розрахунку, розвитку програмних засобів з вбудованими оптимізаційними алгоритмами та методами, а також проводити польові дослідження для перевірки точності

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Білякович О. І., Тарасюк С. В. Дослідження експлуатаційного стану покриттів аеродромів. Вісник Національного транспортного університету. 2021. № 2. С. 33–41.
2. Tarefder, R. A., & Ahmed, A. (2013). Consistency and accuracy of selected FWD backcalculation software for computing layer modulus of airport pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(2), 123–132. DOI: 10.1080/10298436.2012.693051
3. Munir, M., & Mohammad, L. N. (2010). Evaluation of resilient modulus predictive models using LTPP data. *Transportation Research Record*, 2186(1), 40–49. DOI: 10.3141/2186-01
4. Varma, S., Kutay, M. E., & Levenberg, E. (2013). Viscoelastic backcalculation of traffic speed deflection measurements. *Transportation Research Record*, 2369(1), 75–84. DOI: 10.3141/2369-05
5. Zhang, K., Zhang, H., & Zheng, J. (2019). Back-Calculation of Soil Modulus from PFWD Based on a Viscoelastic Model. *Mathematical Problems in Engineering*. DOI: 10.1155/2019/1316341
6. Singh, D., Kumar, P., & Reddy, K. S. (2021). Prediction of back-calculated layer moduli using cuckoo search algorithm for pavement asset management at a network level. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(2), 220–229. DOI: 10.1007/s41062-021-00553-6
7. Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A., & Carpenter, S. H. (2023). Effects of Transverse Cracks on the Backcalculated Layer Properties Using FWD Data. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42(2), 45–57. DOI: 10.1007/s10921-023-00978-2
8. Wang, H., Xie, P., Ji, R. (2020). Backcalculation of Airfield Pavement Layer Moduli Under HWD Testing. In: *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 96, Springer, Cham.
9. Elie Y. Hajj, Rami Skaff, Peter E. Sebaaly, Xiaolong Ma, Heyang Qin, Feng Yan. (2024). Enhancing Pavement Assessment With Dynamic Backcalculation: A Dynamic FE Approach. DOT/FAA/TC-24/13.
10. Kameyama, S., Himeno, K., Kasahara, A., Maruyama, T. (1999). Backcalculation of Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*.
11. Bouriaud, F., Roult, G., et al. (2016). Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the Lévy Ant Colony Optimization Algorithm. *Construction and Building Materials*, Volume 119, 2016, Pages 288–295.
12. Ketcham, S. A. (1993). Dynamic Response Measurements and Identification Analysis of a Pavement During Falling-Weight Deflectometer Experiments. *Transportation Research Record* 1415.

REFERENCES

1. Bilyakovich O. I., Tarasyuk S. V. Research on the operational condition of airfield coatings. *Bulletin of the National Transport University*. 2021. No. 2. P. 33–41.
2. Tarefder, R. A., & Ahmed, A. (2013). Consistency and accuracy of selected FWD backcalculation software for computing layer modulus of airport pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(2), 123–132. DOI: 10.1080/10298436.2012.693051
3. Munir, M., & Mohammad, L. N. (2010). Evaluation of resilient modulus predictive models using LTPP data. *Transportation Research Record*, 2186(1), 40–49. DOI: 10.3141/2186-01
4. Varma, S., Kutay, M. E., & Levenberg, E. (2013). Viscoelastic backcalculation of traffic speed deflection measurements. *Transportation Research Record*, 2369(1), 75–84. DOI: 10.3141/2369-05
5. Zhang, K., Zhang, H., & Zheng, J. (2019). Back-Calculation of Soil Modulus from PFWD Based on a Viscoelastic Model. *Mathematical Problems in Engineering*. DOI: 10.1155/2019/1316341
6. Singh, D., Kumar, P., & Reddy, K. S. (2021). Prediction of back-calculated layer moduli using cuckoo search algorithm for pavement asset management at a network level. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(2), 220–229. DOI: 10.1007/s41062-021-00553-6

7. Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A., & Carpenter, S. H. (2023). Effects of Transverse Cracks on the Backcalculated Layer Properties Using FWD Data. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42(2), 45–57. DOI: 10.1007/s10921-023-00978-2
8. Wang, H., Xie, P., Ji, R. (2020). Backcalculation of Airfield Pavement Layer Moduli Under HWD Testing. In: *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 96, Springer, Cham.
9. Elie Y. Hajj, Rami Skaff, Peter E. Sebaaly, Xiaolong Ma, Heyang Qin, Feng Yan. (2024). Enhancing Pavement Assessment With Dynamic Backcalculation: A Dynamic FE Approach. DOT/FAA/TC-24/13.
10. Kameyama, S., Himeno, K., Kasahara, A., Maruyama, T. (1999). Backcalculation of Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*.
11. Bouriaud, F., Roult, G., et al. (2016). Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the Lévy Ant Colony Optimization Algorithm. *Construction and Building Materials*, Volume 119, 2016, Pages 288-295.
12. Ketcham, S. A. (1993). Dynamic Response Measurements and Identification Analysis of a Pavement During Falling-Weight Deflectometer Experiments. *Transportation Research Record* 1415.

РЕФЕРАТ

Коршак А.В. Аналіз методів оберненого розрахунку модуля пружності аеродромних покриттів на основі випробувань FFWD / А.В. Коршак // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У статті проведено порівняльний аналіз сучасних методів оберненого розрахунку модуля пружності шарів аеродромних покриттів на основі даних, отриманих із випробувань дефлектометром падаючої навантаги (Fast Falling Weight Deflectometer, FFWD).

Об'єкт дослідження – методи оберненого розрахунку.

Мета роботи – аналізування сучасних методів оберненого розрахунку для визначення модулів пружності аеродромних покриттів на основі даних FFWD випробувань

Методи дослідження – для досягнення мети роботи використовувалися наступні методи: аналіз, синтез, систематизація, узагальнення, формулювання висновків.

Розглянуто основні підходи, що застосовуються в інженерній практиці та наукових дослідженнях: класичний метод багатошарової еластичної системи, динамічне числове моделювання з використанням скінченних або спектральних елементів, методи оптимізації, а також хвильові методи, що враховують повну часову історію прогинів. Було проаналізовано переваги та недоліки кожного методу за критеріями точності результатів, залежність від дефектів покриття, необхідність у вихідних даних, складність розрахунків і практичне застосування. Врахування динамічних ефектів суттєво підвищує точність оцінювання модулів, але вимагає складного моделювання і детальних вихідних характеристик.

Для кожного з методів наведено приклади з літератури та результати їх порівняння. Отримані результати можуть бути корисними при проєктуванні, діагуванні та моніторингу технічного стану аеродромних покриттів.

На основі проведеного аналізу запропоновано рекомендації щодо вибору оптимального методу залежно від конкретних умов дослідження, цілей діагностики та наявності даних. Узагальнення дозволяють систематизувати ключові характеристики методів, що сприяє підвищенню ефективності процесу оцінки технічного стану аеродромних покриттів. Результати дослідження мають важливе значення для практичних інженерних задач, пов'язаних із проєктуванням, експлуатацією та моніторингом інфраструктури аеродромів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АЕРОДРОМНЕ ПОКРИТТЯ, ДЕФЛЕКТОМЕТРИЧНІ ВИПРОБУВАННЯ, ОБЕРНЕНИЙ РОЗРАХУНОК, МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ, FWD, НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ.

ABSTRACT

Korshak A.V. Analysis of methods for inverse calculation of the modulus of elasticity of airport pavement based on ffwd tests. *Visnyk National Transport University. Series «Technical Sciences»*. Scientific, scientific and production journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article presents a comparative analysis of modern methods of inverse calculation of the elastic modulus of airport pavement layers based on data obtained from tests using a Fast Falling Weight Deflectometer (FFWD).

The object of the study is inverse calculation methods.

The purpose of the work is to analyze modern inverse calculation methods for determining the elastic moduli of airfield pavements based on FWD test data.

Research methods: the following methods were used to achieve the purpose of the work: analysis, synthesis, systematization, generalization, and formulation of conclusions.

The main approaches used in engineering practice and scientific research are considered: the classical method of a multilayer elastic system, dynamic numerical modeling using finite or spectral elements, optimization methods, as well as wave methods that take into account the complete time history of deflections. The advantages and disadvantages of each method were analyzed according to the criteria of accuracy of results, dependence on coating defects, the need for initial data, the complexity of calculations, and practical application. Taking dynamic effects into account significantly increases the accuracy of module assessment, but requires complex modeling and detailed initial characteristics.

For each method, examples from the literature and the results of their comparison are given. The results obtained can be useful in the design, diagnosis, and monitoring of the technical condition of airfield pavements.

Based on the analysis, recommendations are made for selecting the optimal method depending on the specific conditions of the study, the objectives of the diagnosis, and the availability of data. The generalizations allow systematizing the key characteristics of the methods, which will contribute to improving the efficiency of the process of assessing the technical condition of airfield pavements. The research results are important for practical engineering tasks related to the design, operation, and monitoring of airfield infrastructure.

KEY WORDS: AIRFIELD PAVEMENT, DEFLECTOMETRIC TESTS, INVERSE CALCULATION, ELASTIC MODULUS, FWD, LOAD-BEARING CAPACITY.

АВТОР:

Коршак Аліна Володимирівна, аспірантка, Національний транспортний університет, головний спеціаліст Управління цифрового та інноваційного розвитку, Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України, e-mail: alinakorshak18@gmail.com, тел: +380505960751, Україна, 03150, м. Київ, вул. Фізкультури, 9, orcid.org/0009-0003-3100-1137

AUTHOR:

Korshak Alina V., postgraduate student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, Chief Specialist, Department of Digital and Innovative Development, State Agency for Infrastructure Restoration and Development of Ukraine, e-mail: alinakorshak18@gmail.com, tel: +380505960751, Ukraine, 03150, Kyiv, Fizkultury Str., 9, orcid.org/0009-0003-3100-1137

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Бубела А.В., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, декан факультету транспортного будівництва, Київ, Україна.

Райковський В. Ф., кандидат технічних наук, доцент, ДП «НІІ», Київ, Україна.

REVIEWER:

Bubela A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Dean of the Faculty of Transport Construction, Kyiv, Ukraine.

Raikovsky V. F., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, SE«NIDI», Kyiv, Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ МИТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ МЕРЕЖІ В УМОВАХ РИЗИКІВ

Лебідь В.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, viktoriia.lebid@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1260-3760

Полуденна К.Ю., Національний транспортний університет, Київ, Україна, poludennayae@gmail.com; orcid.org/0000-0001-9628-5781

RESEARCH ON THE FUNCTIONING OF THE CUSTOMS AND LOGISTICS NETWORK IN RISK CONDITIONS

Lebid V.V., Candidate of Sciences (Engineering), National Transport University, Kyiv, Ukraine, viktoriia.lebid@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1260-3760

Poludenna K.Yu., National Transport University, Kyiv, Ukraine, poludennayae@gmail.com; orcid.org/0000-0001-9628-5781

Постановка проблеми. В сучасних ринкових умовах одним із ключових завдань транспортно-логістичної політики України є підвищення ефективності функціонування складів митних органів та транспортно-логістичної інфраструктури шляхом розроблення моделей і методів формування внутрішньодержавної логістичної мережі складів різних категорій. Існуюча складська мережа характеризується нерівномірним просторовим розподілом, відсутністю уніфікованих підходів до класифікації складів і слабкою інтеграцією між державним і приватним секторами логістики.

В умовах воєнних дій в Україні ця проблема набуває швидких темпів зростання. Руйнування транспортної інфраструктури, погіршення стану дорожньої мережі та ускладнення переміщення товарів між регіонами, у тому числі під час здійснення мультимодальних перевезень, вимагають створення розгалуженої та адаптивної мережі логістичних комплексів.

Аналіз останніх публікацій по проблемі. Дослідженням мережі логістичних комплексів, а також логістичних ланцюгів доставки вантажів займалися такі вчені як Нагорний Є.В., Ширяєва С.В., Прокудін Г.С., Джон Ментзер, Алекса Муравін та інші. Однак варто зауважити, що традиційні та сучасні підходи щодо вивчення функціонування логістичної мережі складів різних категорій концентруються на задачах визначення оптимальних локацій, розмірів та призначень складів з урахуванням транспортних витрат, часу доставки та рівня сервісу. Саме тому моделювання мереж складської інфраструктури, прийняття рішень щодо їх розміщення з урахуванням ризиків (Covid19, військові дії на митній території України) та невизначеностей вимагають нових досліджень, цифрових рішень у поєднанні з інноваціями у митній сфері.

Формулювання цілей дослідження (постановка завдання).

Метою є дослідження впливу особливих умов функціонування економіки України на нові тенденції створення логістичних комплексів, визначити науково обґрунтовані підходи до моделювання та оптимізації внутрішньодержавної логістичної мережі складів різних категорій з урахуванням факторів ризику, безпеки та ефективності.

Виклад основних результатів та їх обґрунтування.

В умовах конкурентної боротьби на ринку транспортних послуг важливе місце займає пошук раціональних шляхів транспортного обслуговування, обґрунтування транспортно-технологічних схем доставки вантажів, впровадження прогресивних форм і методів організації процесу перевезень та надання супутніх послуг, удосконалення діючих та розробка перспективних технологій організації транспортного процесу. Доставка вантажів у міжнародному сполученні може здійснюватися самостійно вантажовласником або із залученням посередників, що об'єднуються в логістичний ланцюг (надалі ЛЛ).

Чи не найважливішою ознакою сучасного стану розвитку світової економіки є зміцнення інтеграційних процесів, кінцевим результатом якого є зростання обсягу транснаціональних

перевезень, міжнародного транзиту вантажів. Зручне географічне положення України на шляху основних транзитних потоків між Азією і Європою, наявність незамерзаючих морських портів і розвинутої мережі залізниць, автомобільних доріг, трубопроводів зумовлює цю перевагу як країни-транзитера енергоресурсів, сировинних матеріалів та товарів широкого вжитку. Однак воєнні дії на території України істотно змінили умови функціонування транспортно-логістичної системи та митної інфраструктури, включаючи логістичні комплекси різного спрямування. Тут важливо зауважити, що руйнування об'єктів логістичної інфраструктури, блокування морських портів та пошкодження митних переходів призводять щодня до суттєвих обмежень у здійсненні транзиту і зовнішньоекономічних операцій.

За таких умов Україна вимушена переглядати підходи до організації митних процедур, розміщення логістичних центрів та формування внутрішньодержавної мережі складів, що здатні функціонувати в умовах підвищених ризиків, оперативно адаптуватися до змін транспортних маршрутів і забезпечувати безпечне проходження товаропотоків. Врахування ризиків воєнних дій у митній сфері є необхідною умовою підвищення стійкості зовнішньоекономічної діяльності та збереження транзитного потенціалу держави.

Транспортна система України має низький рівень розвитку транспортно-логістичних технологій та об'єктів мультимодальних перевезень, що знижує її конкурентоспроможність та обмежує вихід української продукції на світовий транспортний ринок. За рейтингом конкурентоспроможності Україна знаходиться на 85 місці у світі, а за індексом логістичної ефективності – на 66-му. Високі витрати на транспортування становлять близько 40% загальної вартості продукції. На жаль, жодного з українських портів немає у Топ-100 найбільших контейнерних портів світу. Мультимодальні та інтермодальні перевезення вантажів займають в Україні не більше 0,5% транспортного ринку, за цим показником Україна відстає від держав учасниць ЄС та інших розвинених держав світу у 20–30 разів. Транспортна система України межує з Транс'європейською транспортною мережею TEN-T, але поки що не може бути повноцінно приєднана до неї через низький рівень інтероперабельності та загальне технологічне відставання [2].

При проектуванні транспортно-складських систем на загальнодержавному та регіональному рівнях необхідно враховувати їх розташування у вузлах зосередження основних вантажопотоків міста, району, регіону (області), оскільки через такі системи перевозиться 70-80% всіх вантажів, на відміну від 40 до 60% вантажу на локальному рівні [3].

Координація і взаємодія різних видів транспорту при здійсненні мультимодальних перевезень вантажів базується на наступних принципах:

- створення єдиної технології для координації видів транспорту в транспортних вузлах і інших стикових пунктах;
- розроблення маршрутизації для всіх видів транспорту за узгодженими розкладами на всьому шляху проходження вантажів;
- запровадження схем щодо оптимізації роботи вантажно-розвантажувальної техніки при перевалці вантажів, комплексне використання технічних засобів різними видами транспорту;
- оперативне планування контейнерних та інших перевезень, подачі і сортування рухомого складу в транспортних вузлах;
- запровадження інформаційно-логістичного супроводу перевезень вантажів;
- узгодження економічних інтересів учасників мультимодальних перевезень вантажів;
- запровадження блокчейн технологій та ГІС-технологій для підвищення надійності транспортування вантажів;
- створення єдиного транспортного законодавства.

Для інтенсифікації запровадження мультимодальних перевезень в Україні необхідна їх підтримка на державному рівні, розбудова об'єктів транспортно-логістичної інфраструктури, створення транспортних контейнерних терміналів з сучасними транспортними засобами та системами переміщення вантажів.

Стан контейнерних терміналів на залізничній мережі характеризується наступними особливостями:

- серед 275 вантажних станцій робота з контейнерами виконується на 182 станціях; серед яких на 91-й станції проводяться роботи з середньотонажними контейнерами (до 3-5 тонн), на 24-х

станціях виконуються роботи з середньо- та великотонажними контейнерами (20, 40, 45-футові контейнери) і лише на 7-м станцій забезпечені обладнанням для роботи з великотонажними контейнерами;

- робота з великотонажними контейнерами проводиться в основному на Центрі Транспортного Сервісу «Ліски» ПАТ «Укрзалізниця», де використовуються нові технічні засоби;

- Південно-Західній регіональній філії налічується 29 контейнерних терміналів, на Південній філії – 24, Придніпровській філії – 19, Львівській філії – 16, Донецькій філії – 15 та Одеській регіональній філії – 12;

- роботоздатний стан козлових кранів типу КК-5; КК6,3; ККС-10, КДКК-10, КПБ-10, КК-20 задовольняє 2/3 одиницям серед існуючих 150 одиниць даного типу обладнання; 20 кранів потребують капітального ремонту;

- кожна десята контейнерна площадка закрита для експлуатації через те, що ресурс підкранових колій вичерпано, на кожному четвертому терміналі відсутні автостропи; простій навантажувально-перевантажувальної техніки складає щорічно понад 100 тис год, серед яких п'ята частина – через технічну несправність;

- технології та обладнання відновлювально-ремонтних майстерень застарілі, спостерігається недостатньо зварювальних апаратів, двигунів різних потужностей, кабельного обладнання, запасних частин тощо.

Світові тенденції розвитку митно-логістичної інфраструктури передбачають застосування прогресивних методів доставки товарів, вимагають правомірності дій з боку усіх учасників транспортного процесу та сприяння державних органів влади у формуванні позитивного іміджу України на міжнародному ринку торгівлі і послуг.

У сучасних умовах прискорення інтеграційних процесів особливої актуальності набувають питання конкурентоспроможності національних підприємств. В рамках програм розвитку митної інфраструктури та підприємств транспортно-логістичного комплексу доцільним є вивчення рівня якісних і загальногосподарських показників функціонування об'єктів інфраструктури, здатних здійснювати комплексне обслуговування усіх учасників зовнішньоекономічної діяльності.

Важливим аспектом у розробці оптимальних рішень для суб'єктів ринку транспортних послуг, що здійснюють зовнішньоторговельні операції є своєчасність задоволення потреб, пов'язаних з процесом митно-логістичного обслуговування та оптимізації внутрішньодержавної логістичної мережі, враховуючи при цьому фактори ризику, безпеки переміщення товарів та ефективності цього процесу. Важливим вважається той факт, що в даному випадку необхідно досягнути погодженості дій з боку державних органів влади та приватних підприємств. Ринок міжнародних автомобільних перевезень найбільше зазнає втрат через тривалі черги на обслуговування при взаємодії з державними установами та організаціями. Низький рівень інфраструктурного забезпечення та недостатня кількість кваліфікованого персоналу, здатного задовольнити потреби суб'єктів ринку транспортних послуг в обслуговуванні, спричиняють ряд затримок, і відповідно призводять до порушення термінів доставки, зниження рівня надійності та якості послуг, що надаються як резидентам, так і нерезидентам

Стабільний попит на митно-логістичні послуги забезпечується експортними та імпор্তними вантажопотоками, що формуються бізнесом. В той же час з боку держави спостерігається значний дефіцит дозволів на міжнародні перевезення, недосконала інфраструктура та ряд перешкод, які виникають при взаємодії з митними органами. Тому, доцільним вважається пошук шляхів удосконалення взаємодії державного і приватного секторів при виконанні зовнішньоторговельних операцій [8].

Мультиmodalні перевезення в Україні не набули необхідного розвитку через низку причин, до яких можна віднести як нормативно-правові так і організаційно-технічні [9]:

- недосконалість нормативно-правового врегулювання питань змішаних перевезень, невизначеність стратегічних засад їх розвитку. Навіть попри наявність законодавчих ініціатив, на сьогодні відсутня комплексна правова база, яка б унормовувала мультиmodalні перевезення відповідно до європейських стандартів Regulation 2020/1056;

- невідповідність між потенціалом морських портів і можливостями залізничної та автомобільної логістичної мережі у поєднанні з роботою митно-логістичних складів, що обмежує

розвиток контейнерних та контрейлерних перевезень, що унеможливило б розвиток інтермодальних перевезень;

- високі ризики мультимодальних операторів при організації мультимодальних перевезень на значні відстані за участю двох і більше видів транспорту. В умовах воєнних дій в Україні ризики все більшого значення набувають не тільки фінансового характеру, а і безпекового, таким чином це призводить до зростання страхових тарифів на всіх видів транспорту ;

- відсутність в Україні розвинутої мережі транспортно-логістичних центрів, а також інституту мультимодальних (логістичних) операторів. Нині транспортно-логістична мережа лише створюється і намагається створити потужний потенціал (війна → руйнування → потреба в адаптивних логістичних рішеннях в тенденція створення розгалуженої мережі логістичних комплексів);

- недостатність високопрофесійних і досвідчених спеціалістів з питань мультимодальних перевезень, які б на достатньому рівні володіли декількома іноземними мовами, знаннями національного і міжнародного права, практичним досвідом використання особливостей ведення переговорного процесу щодо укладання та реалізації договорів, сучасними відомостями стосовно стану ринку транспортних послуг у країнах-партнерах та актуальної тарифної політики представників партнерської мережі, ефективними методами митного контролю за пересуванням товарів на значні відстані з використанням двох і більше видів транспорту в режимі реального часу (онлайн), досвідом у процедурних питаннях розгляду судових справ та міжнародного арбітражного правочину тощо. Тому вагомим питанням на сьогодні залишається системна підготовка логістів нового покоління, які б володіли знаннями з міжнародного права, митного регулювання та цифрових технологій.

Подолання вказаних проблем та розвиток мультимодальних перевезень є одним з пріоритетних напрямків «Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року».

Стратегія, зокрема, передбачає наступні кроки:

- збільшення частки контейнерних та контрейлерних перевезень, широке впровадження мультимодальних та інтермодальних технологій у перевізний процес, інтероперабельність транспортних систем у складі ланцюгів поставок;

- удосконалення технології організації мультимодальних перевезень, зокрема, шляхом формування мультимодальних транспортно-логістичних систем та відповідних інфраструктурних комплексів (портових комплексів, логістичних центрів, «сухих» портів, перевантажувальних комплексів) ;

- формування нормативно-правової бази розвитку інтермодальних, мультимодальних перевезень, транспортної логістики;

- стимулювання розвитку мультимодальних перевезень шляхом створення сприятливих умов для вантажовласників та перевізників, зокрема й на законодавчому рівні;

- створення мережі маршрутів регулярних контейнерних та контрейлерних вантажних поїздів, в першу чергу, на міжнародних напрямках; У результаті виконання цих кроків передбачається досягнення таких цілей:

- входження морських портів України до ТОП-100 найбільших контейнерних портів світу;

- збільшення транзиту контейнерів через територію України до 1 млн TEU/на рік у 2025 р., та до 2 млн TEU/на рік у 2030 р. 19

- досягнення рівня контейнеризації перевезень 10 % у 2025 р., та 20 % у 2030 р.

- входження у 2025 р. у ТОП-50, а у 2030 р. – у ТОП-20 світового рейтингу за індексом логістичної ефективності.

Для об'єктивної оцінки функціонування транспорту в Україні, слід взяти до уваги ряд показників його роботи. Критеріями оцінки роботи транспорту є: вантажообіг, обсяг перевезень вантажів співвідношення видів транспорту у вантажних перевезеннях, обсяг перевезень пасажирів, пасажирообіг, вартість перевезення, транспортомісткість, співвідношення пасажирських і вантажних перевезень в економіці країни.

В Україні сучасна оцінка стану мультимодальних перевезень призводить до висновку, що в нас як недостатня кількість терміналів, так і недосконале нормативно-правове регулювання даного типу перевезень. Необхідно, перш за все, розвивати логістичну інфраструктуру, одним з пріоритетним напрямком якої є розвиток транспортної системи та синхронізація в роботі різних видів транспорту з урахуванням взаємодії з митно-логістичними складами. Слід зазначити, що через

відсутність достатньої кількості мультимодальних терміналів на території України, лідером в перевезенні контейнерів є автомобільний транспорт, на долю якого приходить до 80% перевезень зазначеного типу.

В умовах постійно зростаючих потреб споживачів, у зв'язку з погіршенням стану дорожньої мережі та ускладнення переміщення товарів між регіонами, забезпечення стійкої позиції на ринку та високого рівня конкурентоспроможності послуг є невід'ємною умовою ефективної, прибуткової діяльності митно-логістичних комплексів. Відповідно, досягнути таких результатів можливо лише за умови моніторингу потреб існуючих та потенційних споживачів митно-логістичних послуг, залучення додаткових фінансових інвестицій для удосконалення та розширення можливостей об'єктів інфраструктури.

На сьогодні держава зацікавлена в формуванні позитивного іміджу країни, як торгового партнера, максимальних надходженнях до державного бюджету від сплати податків і митних платежів за виконані експортно-імпорتنі операції. Суб'єкти ринку транспортних послуг потребують швидкого та якісного виконання своїх зобов'язань перед контрагентами, а утримувачі митно-логістичних складів зацікавлені в отриманні прибутків від діяльності та досягнення відповідного рівня конкурентоспроможності у порівнянні з іншими об'єктами інфраструктури. Таким чином, можемо сформулювати думку про те, що підвищення ефективності діяльності митно-логістичних комплексів є досить актуальним, як з точки зору організації обслуговування резидентів України при виконанні зовнішньоторговельних операцій, так і зацікавленості до національного ринку торгівлі товарами і послугами з боку нерезидентів.

Отримані результати вимагають прийняття ряду управлінських рішень, які сприяли б зростанню попиту на митно-логістичні послуги митних складів та складів тимчасового зберігання, і, відповідно, забезпечували їх розбудову за рахунок фінансових надходжень від діяльності. Дане впровадження має ряд позитивних моментів, серед яких слід відзначити:

- концентрація широкого сегмента послуг в рамках діяльності однієї юридичної особи, що значно зменшить час очікування в чергах на обслуговування;
- збільшення попиту на послуги митного складу та складу тимчасового зберігання забезпечать отримання додаткових фінансових ресурсів, які можуть бути використані на вдосконалення технічного, технологічного та організаційного забезпечення даного об'єкта інфраструктури.

Впровадження будь-яких заходів з оптимізації митно-логістичних послуг можливо лише за умови розуміння спеціалізації діяльності об'єкту інфраструктури та його «вузьких місць». Оскільки, застосування єдиних рекомендацій до даного суб'єкту господарювання знайти досить складно.

Висновки. Для України створення розгалуженої мережі логістичних комплексів, які зможуть забезпечувати митно-логістичні послуги має певні специфічні виклики – практично щодня відбувається руйнування діючої інфраструктури, перерозподіл транзитних потоків, виникають нормативні прогалини. А відтак на сьогодні перед науковцями та бізнесом постає нове завдання – необхідний новий підхід до типізації складів за ознаками їх розташування, функціональної спеціалізації та ступеня ризику. Такий підхід дозволить здійснювати більш точне планування логістичної мережі з урахуванням інтегрованості її у європейський логістичний простір.

Також питання діяльності складів митних органів є недостатньо дослідженими як в науковому, так і практичному аспекті. Законодавча база наразі зазнає кардинальних змін, оскільки не враховує процедури, пов'язані з відкриттям об'єкту митної інфраструктури, його експлуатацією та ліквідацією. Окрім цього, відсутні єдині вимоги до їх облаштування, а також до технічного, технологічного та організаційного забезпечення. Не менш важливим на сьогодні є дослідження та розробка нових науково-обґрунтованих підходів до моделювання розміщення складів митних органів, які враховуватимуть транспортні витрати, рівні ризику, зможуть забезпечувати надійність логістичних маршрутів та безпеку переміщення вантажів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року [Електронний ресурс] : розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 трав. 2018 р. № 430-р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (дата звернення: 08.05.2025).

2. Бубела А. В., Полуденна К. Ю. Формування внутрішньодержавної мережі логістичних послуг в особливих умовах / Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні транспортні системи: екологія, безпека, якість, комфорт». – Київ : НТУ, 2022. – Вип. 1. – С. 38–40.
3. Лебідь В. В., Вербицька Н. А. Правове підґрунтя діяльності митних складів та складів митних органів при імпорті товарів на митну територію України // *Проблеми організації, управління та підвищення ефективності перевезень*: монографія / за ред. Г. С. Прокудіна, Л. М. Савчук. – Дніпро : Пороги, 2021. – С. 253–260.
4. Лужанська Н. О., Лебідь І. Г., Гужевська Л. А., Гальона І. І., Коп'як Н. В. Логістичне управління процесом доставки вантажів у міжнародному сполученні // *Сучасні реалії фінансово-економічного розвитку регіонів, галузей, підприємств, бізнесу*: монографія / за ред. Л. М. Савчук, Л. М. Бандоріної. – Дніпро : [б. в.], 2020. – С. 151–182.
5. Naz F., Kear M. Impact of Ukraine war on global energy and food supply chains // *Strategic Studies*. – 2022. – Vol. 42, No. 2. – P. 38–53.
6. Bokovets V., Bezsmertna O., Shvarts I. Warehouse logistics in Ukraine during the war: Problems and innovative solutions // *Innovation and Sustainability*. – 2024. – Vol. 4, No. 2. – P. 127–133. – DOI: 10.31649/ins.2024.2.127.133. – Режим доступу: <https://inns.com.ua/en/journals/tom-4-2-2024/skladyska-logistika-ukrayini-pid-chas-viyni-problemi-ta-innovatsiyni-rishennya> (дата звернення: 08.10.2025).
7. Polivantsev A. Priorities for the development of logistics infrastructure in Ukraine // *The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series: International Relations. Economics. Country Studies. Tourism*. – 2024. – No. 20-05. – DOI: 10.26565/2310-9513-2024-20-05. – Режим доступу : <https://periodicals.karazin.ua/irtb/article/view/25848>
8. Pavlenko O., Volkova T., Muzylov D., Medvediev Y. Simulation model of the functioning of the logistics system for the supply of grain cargoes from Ukraine to the countries of the world // *Municipal Economy of Cities*. – 2024. – Vol. 6, No. 187. – P. 295–301. – DOI: 10.33042/2522-1809-2024-6-187-295-301. – Режим доступу: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6421>
9. Dvulit Z. P., Skrypnyk Y. M. The role of industrial parks and warehouse logistics in the context of recovery of the economy of Ukraine // *SMEU*. – 2024. – Vol. 6, No. 1. – P. 190–198. – Режим доступу: <https://sciencetst.lpnu.ua/smeu/all-volumes-and-issues/volume-6-number-1-2024/role-industrial-parks-and-warehouse-logistics>
10. Lebid I., Luzhanska N., Mazurenko A., Halona I., Horban A., Mykhailenko I., Sotnikova T. Construction of a simulation model of goods delivery in international road transportation taking into account the functioning efficiency of logistics supply chain // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2023. – Vol. 3, No. 3 (123). – P. 57–67. – DOI: 10.15587/1729-4061.2023.280886. – Режим доступу: <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/280886>
11. Mykhailik N. I. The main challenges and prospects of transport logistics development in the conditions of war // *The Actual Problems of Regional Economy Development*. – 2024. – No. 1 (20). – P. 163–172. – DOI: 10.15330/apred.1.20.163-172. – Режим доступу: <https://personnel.pnu.edu.ua/index.php/apred/article/view/8106>

REFERENCES

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (2018). *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku* [Approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030]. Ofitsiyniy vebportal parlamentu Ukrainy – Official web portal of the Parliament of Ukraine. Retrieved May 8, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> [in Ukrainian].
2. Bubela, A. V., & Poludenna, K. Yu. (2022). *Formuvannia vnutrishnoderzhavnoi merezhi lohistychnykh posluh v osoblyvykh umovakh* [Formation of the domestic logistics service network under special conditions]. *Intellektualni transportni systemy: ekolohiia, bezpeka, yakist, komfort – Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort*, 1, 38–40 [in Ukrainian].
3. Lebid, V. V., & Verbytska, N. A. (2021). *Pravove pidgruntia diialnosti mytnykh skladiv ta skladiv mytnykh orhaniv pry importi tovariv na mytnu terytoriiu Ukrainy* [Legal basis of customs warehouse operations during import of goods into Ukraine]. In H. S. Prokudin & L. M. Savchuk (Eds.), *Problemy orhanizatsii, upravlinnia ta pidvyshchennia efektyvnosti perevezen' – Problems of organization, management and efficiency of transportation* (pp. 253–260). Dnipro: Porohy [in Ukrainian].

4. Luzhanska, N. O., Lebid, I. H., Huzhevska, L. A., Haliona, I. I., & Kopiak, N. V. (2020). *Lohistychne upravlinnia protsesom dostavky vantazhiv u mizhnarodnomu spoluchenni* [Logistics management of cargo delivery in international communication]. In L. M. Savchuk & L. M. Bendorina (Eds.), *Suchasni realii finansovo-ekonomichnoho rozvytku rehioniv, haluzei, pidpriemstv, biznesu – Modern realities of financial and economic development of regions, industries, enterprises, business* (pp. 151–182). Dnipro [in Ukrainian].
5. Naz, F., & Kear, M. (2022). Impact of Ukraine war on global energy and food supply chains. *Strategic Studies*, 42 (2), 38–53.
6. Bokovets, V., Bezsmertna, O., & Shvarts, I. (2024). Warehouse logistics in Ukraine during the war: Problems and innovative solutions. *Innovation and Sustainability*, 4 (2), 127–133. <https://doi.org/10.31649/ins.2024.2.127.133>
7. Polivantsev, A. (2024). Priorities for the development of logistics infrastructure in Ukraine. *The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series: International Relations. Economics. Country Studies. Tourism*, (20-05). <https://doi.org/10.26565/2310-9513-2024-20-05>
8. Pavlenko, O., Volkova, T., Muzylov, D., & Medvediev, Y. (2024). Simulation model of the functioning of the logistics system for the supply of grain cargoes from Ukraine to the countries of the world. *Municipal Economy of Cities*, 6 (187), 295–301. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-295-301>
9. Dvulit, Z. P., & Skrypnyk, Y. M. (2024). The role of industrial parks and warehouse logistics in the context of recovery of the economy of Ukraine. *Scientific Messenger of Lviv Polytechnic National University: Series of Management and Entrepreneurship in Ukraine – SMEU*, 6 (1), 190–198.
10. Lebid, I., Luzhanska, N., Mazurenko, A., Halona, I., Horban, A., Mykhailenko, I., & Sotnikova, T. (2023). Construction of a simulation model of goods delivery in international road transportation taking into account the functioning efficiency of logistics supply chain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (3 [123]), 57–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280886>
11. Mykhailik, N. I. (2024). The main challenges and prospects of transport logistics development in the conditions of war. *Actual Problems of Regional Economy Development*, 1 (20), 163–172. <https://doi.org/10.15330/apred.1.20.163-172>

РЕФЕРАТ

Лебідь В.В. Дослідження функціонування митно-логістичної мережі в умовах ризиків / В.В. Лебідь, К.Ю. Полуденна // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

В статті розглянуто питання функціонування митно-логістичних складів у структурі внутрішньодержавної логістичної мережі з урахуванням впливу ризиків воєнних дій на митній території України. Проаналізовано сучасний стан митно-логістичної інфраструктури, тенденції розвитку мультимодальних перевезень та запропоновано необхідність адаптації логістичних комплексів до особливих умов воєнного часу.

Об'єкт дослідження – процес функціонування складів митних органів в митно-логістичній мережі.

Мета роботи – аналіз функціонування складів митних органів у структурі внутрішньодержавної логістичної мережі.

Метод дослідження – аналітичний. Результати даного дослідження можуть бути використані при розробленні програм підвищення стійкості транспортно-логістичної інфраструктури та вдосконаленні нормативно-правового забезпечення митної діяльності в контексті оптимізації митно-логістичних послуг.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЛОГІСТИЧНА МЕРЕЖА, СКЛАДИ МИТНИХ ОРГАНІВ, РИЗИКИ, МУЛЬТИМОДАЛЬНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ.

ABSTRACT

Lebid V. V., Poludenna K. Yu. Reserch on the functioning of the customs and logistics network in risk conditions. *Visnyk National Transport University. Series «Technical Sciences»*. Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2025. – Issue 1 (60).

The article examines the functioning of customs and logistics warehouses within the structure of the domestic logistics network, taking into account the impact of military risks on the customs territory of Ukraine. It analyzes the current state of customs and logistics infrastructure, trends in the development of multimodal transport, and proposes the need to adapt logistics complexes to the special conditions of wartime.

A methodological approach is proposed to assess the efficiency of customs warehouse operation based on logistics chain analysis and scenario modeling of warehouse location, considering transportation costs, operational safety, and risk of losses.

Object of research is the process of customs warehouses operation within the logistics network.

Purpose: to improve the scientific approaches to the formation and optimization of the logistics network of customs warehouses, taking into account wartime risks and transportation safety.

Research methods: system and scenario analysis, methods of logistics modeling, and analytical calculations.

The results can be used for the development of programs to enhance the resilience of transport and logistics infrastructure and to improve the regulatory framework of customs activities.

KEYWORDS: CUSTOMS AFFAIRS, LOGISTICS NETWORK, CUSTOMS WAREHOUSES, WARTIME RISKS, EFFICIENCY, MODELING, MULTIMODAL TRANSPORTATION.

АВТОРИ:

Лебідь Вікторія Вікторівна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, e-mail: vikky85@ukr.net, тел. +380663416145, Україна, 01010 Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка 1, к.437, orcid.org/0000-0002-1260-3760

Полуденна Катерина Юріївна, Національний транспортний університет, Національний транспортний університет, аспірант, poludennayae@gmail.com; тел. +38675010567, Україна, 01010 Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка 1, orcid.org/0000-0001-9628-5781

AUTORS:

Victoriia Lebid, PhD, National Transport University, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of international transportations and custom control, e-mail: vikky85@ukr.net, тел. +380663416145, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelianovycha-Pavlenka Str., 1, of. 437, orcid.org/0000-0002-1260-3760

Poludenna Kateryna Yurievna, National Transport University, graduate student, poludennayae@gmail.com; тел. +38675010567, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelianovycha-Pavlenka Str., 1, of. 437, orcid.org/0000-0001-9628-5781

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гульчак Оксана Дмитрівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, в.о. завідувача кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху, Київ, Україна.

Савченко Лілія Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри транспортних технологій та засобів у агропромисловому комплексі, Київ, Україна.

REVIEWER:

Gulchak O.D., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Transport University, Acting Head of the Department of Transport Systems and Road Safety, Kyiv, Ukraine.

Savchenko L.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Head of the Department of Transport Technologies and Means in the Agro-Industrial Complex, Kyiv, Ukraine.

МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ

Малиш М.І., кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, M_Malysh@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4532-0764

Мозговий О.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, , mavimfto@gmail.com, orcid.org/orcid.org/0000-0002-0797-8779

Клочан А.Є., PhD, Національний транспортний університет, Київ, Україна, varsenchuk@gmail.com, orcid.org/0000-0002-4225-9382

OPTICAL SIGNAL MODULATION METHODS

Malysh M.I., PhD in Physical and Mathematical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, M_Malysh@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4532-0764

Mozghovyi O.V., PhD in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, mavimfto@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0797-8779

Klochan A.Ye., PhD, National Transport University, Kyiv, Ukraine, varsenchuk@gmail.com, orcid.org/0000-0002-4225-9382

Вступ. У даній статті проаналізовані різні методи модуляції оптичного сигналу. З метою збільшення обсягу інформації, яка переноситься світловим променем, використовують модуляцію світла. Кількість інформації, яку можна передати шляхом модуляції потоку світла, тим більша, чим більша несуча частота коливаль. Під модуляцією розуміють зміну по заданому закону в часі амплітуди (інтенсивності), частоти, фази або поляризації коливаль оптичного випромінювання. Залежно від того, яка характеристика піддається зміні, розрізняють амплітудну, фазову, частотну або поляризаційну модуляції світла. Найчастіше для модуляції світла використовують ефекти зміни показника заломлення середовища під дією зовнішнього поля: електрооптичні (ефекти Керра і Погкельса), магнітооптичні (ефект Фарадея). У модуляторах, що працюють на цих ефектах, відбувається фазова модуляція світла з наступним перетворенням її в амплітудну модуляцію. Частоти модулюючих сигналів, можуть досягати 10^{11} Гц.

Сучасні системи передачі інформації по оптичних каналах складаються з трьох основних компонентів: передавача, приймача світла та оптичного каналу, по якому передається інформація. У передавачі здійснюється кодування електричних сигналів, перетворення їх в оптичні, які по оптичному каналу пересилаються до приймача, де й відбувається перетворення оптичної інформації в сукупність електричних сигналів. Будь-який детектор приймача є лічильником фотонів, який не реагує на фазу і поляризацію світла. Найчастіше генератором оптичних сигналів служить напівпровідниковий лазерний діод, а приймачем – фотодіод.

Зазвичай для кодування інформації використовується двійкова система. Така система реалізується або шляхом модуляції амплітуди оптичного сигналу або зміною тривалості імпульсного сигналу. Останній тип модуляції відомий як широтно-імпульсна модуляція (ШІМ — англ. pulse-width modulation, PWM). У першому випадку за “одиницю” приймається максимальне значення амплітуди сигналу, а в другому – більша тривалість імпульсів. За “нуль” приймається відповідно мінімальне значення амплітуди сигналу та найменше значення тривалості імпульсного сигналу.

Розрізняють дві основні експериментальні методи реалізації двійкової системи передачі інформації: внутрішнє і зовнішнє керування інтенсивністю світлового потоку. Поява лазерів викликала інтенсивний розвиток методів модуляції світла, заснованих на управлінні когерентним випромінюванням за рахунок зміни параметрів лазера. При цьому багато пристроїв, що застосовуються як зовнішні модулятори, розміщуються всередині оптичного резонатора лазера.

При внутрішній модуляції параметри випромінювання формуються безпосередньо в генераторі оптичного випромінювання, а при зовнішній модуляції параметри випромінювання формуються модуляторами після виходу світла з генератора. Для випромінювання видимого та

ближнього інфрачервоного діапазонів ($10^{14} - 10^{15}$ Гц) можливі частоти модуляції з верхньою межею до $10^{11} - 10^{12}$ Гц.

Внутрішня модуляція. При внутрішній модуляції випромінювання джерело світла модулюється зовнішнім електричним струмом живлення напівпровідникового лазера. Швидкість v передачі інформації в лазерах з вертикальним резонатором $v \leq 1$ Гбіт/с, в лазерах з резонатором Фабрі-Перо $v \leq 2,5$ Гбіт/с, в лазерах з розподіленим зворотним зв'язком та в лазерах з розподіленими брегівськими відбивачами $v \leq 10$ Гбіт/с [1].

Зовнішня модуляція [2]. З усіх методів зовнішньої модуляції [2] нас будуть цікавити лише поляризаційні методи, а саме методи на основі ефектів Керра, Поккельса, Фарадея. Спільним у цих методах є поворот площини поляризації під дією зовнішнього фактору. Спрощена схема дослідження повороту площини поляризації цими методами показана на рис. 1. У цих методах є наявність фотоприймача, який є детектором фотонів, тому інформація про фазу і частоту світлової хвилі, яка падає на фотоприймач, втрачається.

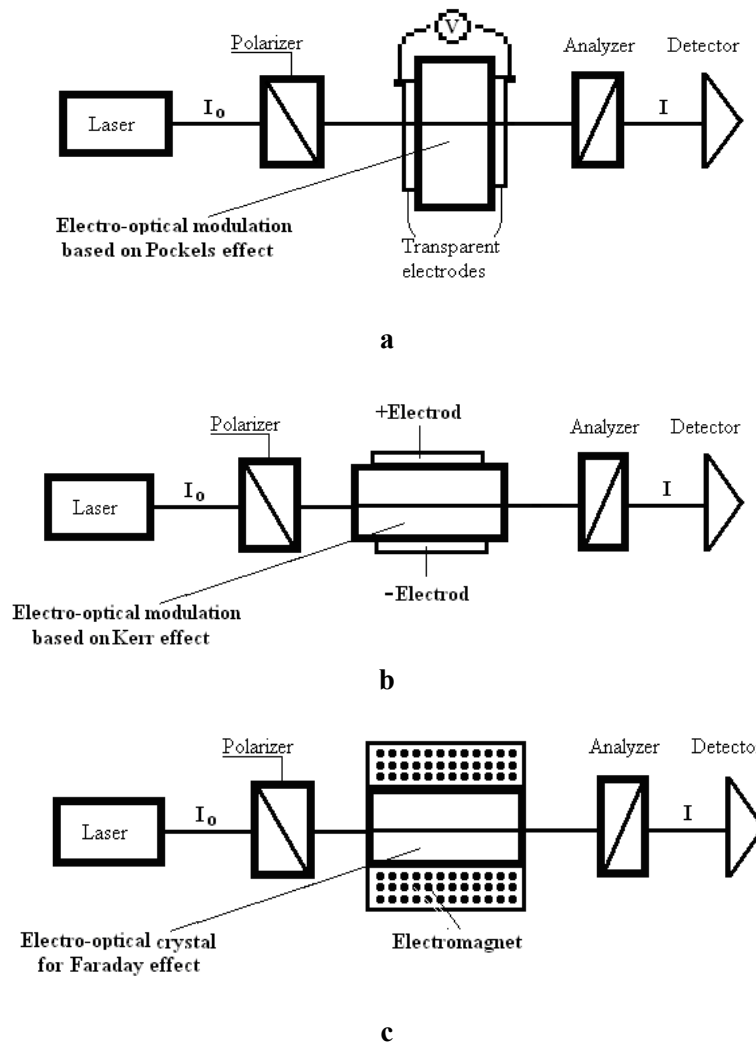


Рисунок 1 – Поляризаційні модулятори на основі ефекту Поккельса (а), Керра (b), Фарадея (c).
Figure 1 – Polarization modulators based on the Pockels effect (a), Kerr (b), Faraday (c)

Головними параметрами, які характеризують амплітудну модуляцію світла, є: основна частота, ширина смуги частот модулюючого сигналу, абсолютне значення амплітуди модуляції та прозорість модулятора, глибина модуляції

$$m = 100\%(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}), \quad (1)$$

де $I_{\min}$ і $I_{\max}$ – мінімальне і максимальне значення інтенсивності.

У наведених на (рис. 1) поляризаційних модуляторах інтенсивність світла I на виході з аналізатора описується законом Малюса [3]:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi = I_0 \cos^2 \left(\varphi_0 - \pi \frac{V}{V_\pi} \right), \quad (2)$$

де I_0 – інтенсивність світла на виході з лазера, $\varphi = (\varphi_0 - \pi V / V_\pi)$ – кут повороту площини поляризації, φ_0 – величина зсуву залежності інтенсивності від кута повороту аналізатора, що виникає при увімкненні електричного поля, V – напруга, V_π – півхвильова напруга.

На практиці всі види поляризаційної модуляції світла перетворюються в амплітудну модуляцію або безпосередньо в схемі модулятора, або за допомогою спеціальних пристроїв, які розміщені на виході з передавача.

Електрооптична модуляція. Показник заломлення електрооптичного середовища $n(E)$ є функцією напруженості електричного поля E [3,4]

$$n(E) = n + a_1 E + 0,5 a_2 E^2 + \dots, \quad (3)$$

де $n = n(E=0)$, $a_1 = (dn/dE)_{E=0}$, $a_2 = d^2 n / dE^2|_{E=0}$. У рівнянні (3) перший доданок не залежить від величини напруженості електричного поля, другий доданок лінійно і третій квадратично залежить від напруженості електричного поля. Величина другого і наступних доданків, як правило, на багато порядків менша за n .

У багатьох матеріалах третій і подальші доданки в рівнянні (3) є незначними у порівнянні з другим. У цьому випадку залежність n від E наступна

$$n(E) \approx n - 0,5 a_p n^3 E. \quad (4)$$

Середовище, для якого виконується рівняння (4), відоме як середовище Покельса. Коефіцієнт a_p називається коефіцієнтом Покельса або лінійним електрооптичним коефіцієнтом. Типові значення a_p знаходяться у діапазоні від 10^{-12} до 10^{-10} В/м. Наприклад, для $E = 10^6$ В/м, прикладеної до комірки товщиною 1 см, доданок $0,5 a_p n^3 E$ у рівнянні (4) становить від 10^{-6} до 10^{-4} . Це означає, що зміни показника заломлення, індуковані електричними полями, дуже малі. Найчастіше в комірках Покельса використовуються наступні кристали: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP), KH_2PO_4 (KDP), LiNbO_3 , LiTaO_3 , CdTe .

Якщо матеріал центросиметричний, як у випадку газів, рідин та деяких кристалів, $n(E)$ має бути парною симетричною функцією. В цьому випадку перша похідна в рівнянні (3) зникає і залежність n від E стає наступною

$$n(E) \approx n - 0,5 a_k n^3 E^2. \quad (5)$$

Матеріал, в якому виконується рівняння (5), відомий як середовище Керра (або комірка Керра). Параметр a_k називається коефіцієнтом Керра або квадратичним електрооптичним коефіцієнтом. Типові значення a_k є від 10^{-18} до 10^{-14} м²/В² у кристалах та 10^{-22} до 10^{-19} м²/В² у рідинах. Для $E = 10^6$ В/м, доданок $a_k n^3 E^2$ за порядком величини становить від 10^{-6} до 10^{-2} у кристалах і від 10^{-10} до 10^{-7} у рідинах [3,4].

Ефект Покельса [3]. Якщо світло проходить через оптичний хвильовод довжиною L , до якого прикладено електричне поле E , воно зазнає фазового зсуву φ

$$\varphi = \frac{2\pi a_p n^3 E L}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} n^3 a_p V = \pi \frac{V}{V_\pi}, \quad (6)$$

де $E = V/L$ – напруженість електричного поля, V – напруга, прикладена до електрооптичного середовища довжиною L , V_π – півхвильова напруга, тобто така величина напруги, при досягненні якої φ стає рівним π

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n^3 a_p}. \quad (7)$$

Як уже згадувалось раніше величина a_p мала, тому значення V_{π} велике. Зокрема при опроміненні кристалу BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) світлом гелій-неонового лазера з $\lambda = 632.8$ нм маємо $n = 2.098$ і $a_p = 1.03 \times 10^{-12}$ м/В, $V_{\pi} \approx 17$ кВ [5] (рис. 2). Згідно з рис. 2 експериментальна залежність пропускання $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ описується законом Малюса.

Як видно з рис. 2, максимальна прозорість BGO комірки Поккельса для $\lambda = 1319$ нм досягається коли величина прикладеної напруги $V = 37772$ В [6]. У той же час для комірки ZnSe $V \approx 21735$ В [6].

При використанні комірок Поккельса для модуляції потоку світла потрібно враховувати необхідність прикладання напруги в кілька десятків кіловольт і нанесення прозорих омичних контактів.

Ефект Керра [7,8]. Під ефектом Керра розуміють виникнення подвійного променезаломлення в оптично ізотропних середовищах у результаті дії на них зовнішнього однорідного електричного поля. В цьому випадку середовище стає анізотропним і набуває властивостей одновісного кристалу, оптична вісь якого направлена вздовж електричного поля.

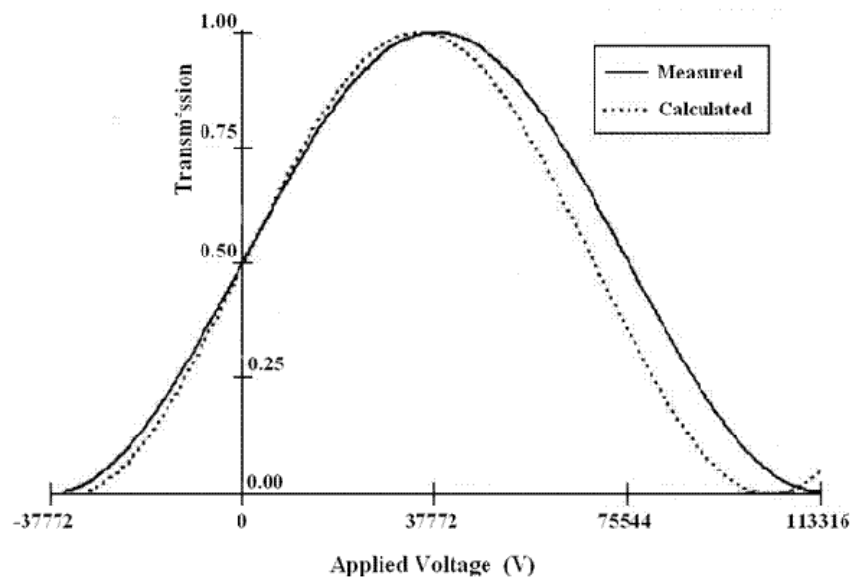


Рисунок 2 – Залежність пропускання BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) комірки Поккельса від напруги її живлення. Довжина хвилі 1319 нм. Електроди виготовлені з ІТО. Адаптовано з [6].

Figure 2 – Dependence of the transmittance of BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) Pockels cell on its supply voltage. Wavelength 1319 nm. Electrodes are made of ITO. Adapted from [6].

Причиною цього є орієнтування електричним полем полярних молекул вздовж напрямку поля та індукування електричного моменту у неполярних молекулах.

Для дослідження ефекту Керра між схрещеними поляризатором і аналізатором розміщують комірку Керра (рис. 1b), у якій міжелектродний простір заповнений прозорою ізотропною речовиною. При увімкненні поля в середовищі відбувається поділ світлового променя на два: звичайний (o) і незвичайний (e). У результаті їх проходження через речовину між ними виникає різниця фаз δ

$$\delta = \frac{2\pi L}{\lambda} \cdot (n_e - n_o) = 2\pi a_K L E^2 = \frac{2\pi a_K L V^2}{d^2}, \quad (8)$$

де L – довжина шляху в речовині, λ – довжина хвилі світла, n_e і n_o відповідно показник заломлення незвичайного і звичайного променя, a_K – постійна Керра, яка залежить від довжини хвилі,

температури, агрегатного стану речовини, структури молекул речовини, E – напруженість електричного поля, V – напруга, d – відстань між електродами.

Можна показати [7], що при наявності електричного поля, прикладеного до электродів комірки Керра, інтенсивність світла I на виході з аналізатора буде

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} = I_0 \sin^2 \frac{\pi a_K L U^2}{d^2}, \quad (9)$$

де I_0 – інтенсивність світла, що падає на поляризатор.

Зазвичай для дослідження ефекту Керра використовуються як гази [7]: molecular hydrogen (H_2), carbon dioxide (CO_2), dimethyl (CH_3) $_2O$, trifluoromethane (CHF_3), так і рідини: nitrobenzene ($C_6H_5NO_2$) [8].

Оскільки ефект Керра відносно слабкий, для його дослідження може знадобитись напруга до 55 кВ. У той же час як комірки Поккельса можуть працювати при значно менших напругах. У широко поширених модуляторах на основі ефекта Поккельса фазовий зсув між звичайним і незвичайним променями лінійно залежить від величини напруженості електричного поля, а в модуляторах на основі ефекта Керра – залежність квадратична.

Ефект Фарадея [9]. Ефект Фарадея полягає у повороті площини поляризації при проходженні лінійно поляризованого світла через прозоре середовище, що знаходиться в поздовжньому магнітному полі. Інтенсивність світла I на виході з середовища описується законом Малюса.

Експериментально встановлено, що різниця між початковим і кінцевим кутовим положенням поляризатора φ (або кут повороту площини поляризації) є такою

$$\varphi_0 = V_e L H, \quad (10)$$

де V_e – константа Верде, яка є функцією довжини хвилі падаючого світла, H – напруженість магнітного поля, L – довжина комірки Фарадея.

Інтенсивність світла на виході з аналізатора I (рис. 3) наступна [4]

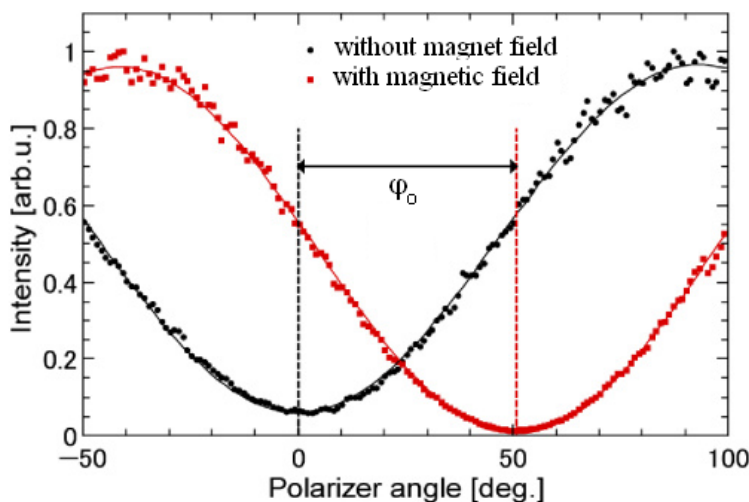


Рис. 3. Залежність інтенсивності від кута повороту аналізатора при наявності (червоні крапки) і відсутності (чорні крапки) магнітного поля. φ_0 – величина зсуву кривої залежності інтенсивності від кута повороту аналізатора, викликаного включенням магнітного поля. Адаптовано з [4]

Fig. 3. Dependence of intensity on the angle of rotation of the analyzer in the presence (red dots) and absence (black dots) of a magnetic field. φ_0 is the mitude of the shift of the curve of the dependence of intensity on the angle of rotation of the analyzer caused by the inclusion of a magnetic field. Adapted from [4]

$$I(\varphi) = I_0 [\cos^2(\varphi_0 + \varphi)] = I_0 [\cos^2(\varphi_0 + V_e L B)], \quad (10)$$

де φ_0 – величина зсуву залежності інтенсивності від кута повороту аналізатора, що виникає при увімкненні магнітного поля, I_0 – інтенсивність світла на вході в поляризатор. У комірках Фарадея досліджуються напівпровідники GaAs, GaSb, Ge, InAs, InSb [10].

Для спрощення вибору методу модуляції оптичних сигналів потрібно скористатись даними таблиці, де наведені основні параметри поляризаційних модуляторів.

Таблиця 1 – Основні параметри поляризаційних модуляторів

Table 1 – Basic parameters of polarization modulators

Параметр	Керр	Поккельс	Фарадей
Середовище	Нітробензол	LiTaO ₃	GaAs
$V_{\lambda/2}$	55.2 кВ	2.7 кВ	0.8 В
Максимальна частота	1 ТГц	(CdTe) до 50 МГц	80 МГц
Глибина модуляції,	100 %	100 %	80 %

Висновок. Швидкість передачі інформації визначається вибором методів амплітудної і поляризаційної модуляції потоку світла. Найпростіше здійснювати амплітудну модуляцію шляхом керування струмом живлення діодних лазерів. Для поляризаційної модуляції світлового потоку доцільно використовувати комірки Фарадея.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. N.A. Shtompel, The choice of modulation method in fiber-optical telecommunication system // Information Systems, 2013, issue 1 (108). <http://www.hups.mil.gov.ua> > soi_2013_1_49.
2. A. Sree Madhuri, Govardhani Immadi, V. Mounika, A. TarunTeja, T. Aakash, N. Sai Srinivasa, Performance Evaluation of Free Space Optics Using Different Modulation Techniques at Various Link Ranges // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249-8958, Volume-8 Issue-4, April 2019. <https://www.ijeat.org> > uploads > papers.
3. E. Bahaa, A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics // Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback); 0-471-2-1374-8 (Electronic).
4. R.A. Minasian, MODULATORS | Modulation and Demodulation of Optical Signals // Encyclopedia of Modern Optics, 2005. <https://www.sciencedirect.com> >
5. F. Long, J. Zhang, C.Xie, Z. Yuanm, Application of the Pockels Effect to High Voltage Measurement // The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments. ICEMI'2007. DOI: 10.1109/ICEMI.2007.4351190.
6. A.J. Iverson, ELECTRO-OPTIC POCKELS CELL VOLTAGE SENSORS FOR ACCELERATOR DIAGNOSTICS // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science in Electrical Engineering MONTANA STATE UNIVERSITY Bozeman, Montana July 2004. <https://citeseerx.ist.psu.edu> > viewdoc > download.
7. A.L.J. Van Rensburg, Theoretical and Experimental Investigations of the Kerr Effect and Cotton-Mouton Effect // Thesis (M.Sc.)-University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, 2008. <http://hdl.handle.net/10413/168>.
8. E.C. Cassidy and H.N. Cones, A Kerr Electro-Optical Technique for Observation and Analysis of High-Intensity Electric Fields // JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards – C. Engineering and Instrumentation. Vol. 73C, Nos. 1 and 2, January-June 1969. <https://nvlpubs.nist.gov> > nistpubs > jresPDF.
9. Modern Optics. Second Edition. B. D. Guenther. © B. D. Guenther 2015. Published in 2015 by Oxford University Press. <https://global.oup.com> > modern-optics-9780198824329.
10. I.M. Boswarva, A.B. Lidiard, Faraday effect in semiconductors. II // 588-609 278 1964 Proc. R. Soc. Lond. A doi: 10.1098/rspa.1964.0084.

REFERENCES

1. N.A. Shtompel, The choice of modulation method in fiber-optical telecommunication system // Information Systems, 2013, issue 1 (108). <http://www.hups.mil.gov.ua> > soi_2013_1_49.
2. A. Sree Madhuri, Govardhani Immadi, V. Mounika, A. TarunTeja, T. Aakash, N. Sai Srinivasa, Performance Evaluation of Free Space Optics Using Different Modulation Techniques at Various Link Ranges // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249-8958, Volume-8 Issue-4, April 2019. <https://www.ijeat.org> > uploads > papers.
3. E. Bahaa, A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics // Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback); 0-471-2-1374-8 (Electronic).
4. R.A. Minasian, MODULATORS | Modulation and Demodulation of Optical Signals // Encyclopedia of Modern Optics, 2005. <https://www.sciencedirect.com> >
5. F. Long, J. Zhang, C.Xie, Z. Yuanm, Application of the Pockels Effect to High Voltage Measurement // The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments. ICEMI'2007. DOI: 10.1109/ICEMI.2007.4351190.
6. A.J. Iverson, ELECTRO-OPTIC POCKELS CELL VOLTAGE SENSORS FOR ACCELERATOR DIAGNOSTICS // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science in Electrical Engineering MONTANA STATE UNIVERSITY Bozeman, Montana July 2004. <https://citeseerx.ist.psu.edu> > viewdoc > download.
7. A.L.J. Van Rensburg, Theoretical and Experimental Investigations of the Kerr Effect and Cotton-Mouton Effect // Thesis (M.Sc.)-University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, 2008. <http://hdl.handle.net/10413/168>.
8. E.C. Cassidy and H.N. Cones, A Kerr Electro-Optical Technique for Observation and Analysis of High-Intensity Electric Fields // JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards – C. Engineering and Instrumentation. Vol. 73C, Nos. 1 and 2, January-June 1969. <https://nvlpubs.nist.gov> > nistpubs > jresPDF.
9. Modern Optics. Second Edition. B. D. Guenther. © B. D. Guenther 2015. Published in 2015 by Oxford University Press. <https://global.oup.com> > modern-optics-9780198824329.
10. I.M. Boswarva, A.B. Lidiard, Faraday effect in semiconductors. II // 588-609 278 1964 Proc. R. Soc. Lond. A doi: 10.1098/rspa.1964.0084.

РЕФЕРАТ

Малиш М.І. Методи модуляції оптичного сигналу/ М.І. Малиш, О.В. Мозговий, А.Є. Клочан // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Проаналізовані різні методи модуляції оптичного сигналу з метою збільшення обсягу інформації, яка переноситься світловим променем. Для модуляції світла запропоновано ефекти зміни показника заломлення середовища під дією зовнішнього поля: електрооптичні (ефекти Керра і Поккельса), магнітооптичні (ефект Фарадея), при використанні яких відбувається фазова модуляція світла з наступним перетворенням її в амплітудну модуляцію.

Мета досліджень: проаналізувати принцип роботи поляризаційних модулаторів, порівняти їх технічні характеристики.

Метод дослідження – теоретичний.

Встановлено, що за допомогою електрооптичних та магнітооптичних ефектів змінюють поляризацію світла для подальшої його модуляції. Для поляризаційної модуляції світлового потоку доцільно використовувати комірки Фарадея.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОДУЛЯЦІЯ СВІТЛА, ЕЛЕКТРООПТИЧНИЙ ЕФЕКТ, МАГНІТООПТИЧНИЙ ЕФЕКТ, ПЕРЕДАЧА ІНФОРМАЦІЇ.

ABSTRACT

Malysh M.I., Mozghovyi O.V., Klochan A.Ye. Optical signal modulation methods. Visnyk National Transport University. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2024. – Issue 1 (60).

Various methods of optical signal modulation have been analyzed in order to increase the amount of information carried by a light beam. For light modulation, the effects of changing the refractive index of the

medium under the action of an external field have been proposed: electro-optical (Kerr and Pockels effects), magneto-optical (Faraday effect), when used, phase modulation of light occurs with its subsequent conversion into amplitude modulation.

Research objective: to analyze the principle of operation of polarization modulators, to compare their technical characteristics.

Research method – theoretical.

It has been established that using electro-optical and magneto-optical effects, the polarization of light is changed for its further modulation. For polarization modulation of the light flux, it is advisable to use Faraday cells.

KEY WORDS: LIGHT MODULATION, ELECTROPTIC EFFECT, MAGNETOPTIC EFFECT, INFORMATION TRANSMISSION.

АВТОРИ:

Малиш Микола Іванович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: M_Malysh@ukr.net, тел. +380442846709, +380508257165, Україна, 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, к. 410, orcid.org/0000-0003-4532-0764.

Мозговий Олександр Васильович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: mavimfto@gmail.com, тел. +380442846709, +380677732434, Україна, 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, к. 410, orcid.org/0000-0002-0797-8779.

Клочан Арсен Євгенійович, PhD, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: varsenchuk@gmail.com, тел. +38(068)-352-81-26, Україна, 01101, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1, orcid.org/0000-0002-4225-9382.

AUTHORS:

Malysh Mykola I., PhD in Physical and Mathematical Science, associate professor, National Transport University, associate professor of the department of information analysis and information security, e-mail: M_Malysh@ukr.net, tel. +380442846709, +380508257165, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk str., 42, of. 410, orcid.org/0000-0003-4532-0764.

Mozghovyi Oleksandr V., PhD in Technical Science, associate professor, National Transport University, associate professor of the department of information analysis and information security, e-mail: mavimfto@gmail.com, tel. +380442846709, +380677732434, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk str., 42, of. 410, orcid.org/0000-0002-0797-8779.

Klochan Arsen Ye., PhD, associate professor, National Transport University, associate professor of the department of information analysis and information security, e-mail: varsenchuk@gmail.com, tel. +38(068)-352-81-26, Ukraine, 01101, Kyiv, Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka str. 1, of. 244-5 orcid.org/0000-0002-4225-9382.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Данчук В.Д., доктор фізико-математичних наук, професор, декан факультету Транспортних та інформаційних технологій, Київ, Україна.

Стрельчук В.В., доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна.

REVIEWER:

Danchuk V.D., doctor of sciences, professor, dean of the Faculty of Transport and Information Technologies, Kyiv, Ukraine.

Strelchuk V.V., doctor of sciences, professor, Leading scientific scientist, V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

ОЦІНКА КОНСТРУКТИВНОЇ НАДІЙНОСТІ БАЛОК ПРОГОНОВИХ БУДОВ ВТП-16 ДОВЖИНОЮ 16,76 М ПРИ АДАПТАЦІЇ ДО НАВАНТАЖЕНЬ КЛАСУ АК-15

Мінюкова А.Д., Національний транспортний університет, Київ, Україна, anyminyukov@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1830-0189

Сташук П.М., кандидат технічних наук, Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна, pavlo.stashuk@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5221-7015

ASSESSMENT OF STRUCTURAL RELIABILITY OF VTP-16 BRIDGE BEAMS (16.76 M) UNDER AK-15 LOAD ADAPTATION

Minyukov A.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, anyminyukov@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1830-0189

Stashuk P.M., Candidate of Sciences (Engineering), State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine, pavlo.stashuk@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5221-7015

Постановка проблеми. Проблема старіння та недостатньої несної здатності залізобетонних мостових конструкцій є глобальним викликом для транспортної інфраструктури. Значна частина мостового фонду в багатьох країнах, зокрема в Україні, була збудована в середині минулого століття, проектування цих споруд здійснювалось відповідно до нормативних документів того часу, які не враховували сучасні інтенсивні транспортні потоки та значно більші навантаження (клас АК-15, НК-100).

Це призводить до того, що існуючі конструкції експлуатуються в умовах, які перевищують їхню проектну міцність. Як наслідок, виникають передчасні дефекти, такі як інтенсивне тріщиноутворення, прискорена корозія арматури та прогресуюче зниження жорсткості, що ставить під загрозу безпеку дорожнього руху. Таким чином, виникає об'єктивна необхідність у розробці та впровадженні ефективних інженерних рішень для відновлення та посилення існуючих конструкцій.

Впровадження ефективних методів посилення дозволяє подовжити термін служби споруд, знизити витрати на їх обслуговування та запобігти можливим аваріям, що має значний соціально-економічний ефект. Розробка технічних рішень для підвищення експлуатаційної надійності мостових споруд нададуть практичні рекомендації для інженерів-проектувальників щодо вибору оптимального методу посилення балок типу ВТП-16, що дозволить ефективно використовувати наявні ресурси та забезпечити безпеку експлуатації мостів.

Аналіз останніх публікацій по проблемі. Проблема старіння та недостатньої несучої здатності залізобетонних мостових конструкцій є предметом широких наукових досліджень як в Україні, так і за кордоном. Аналіз останніх публікацій свідчить, що особлива увага приділяється методам посилення, які дозволяють подовжити термін служби споруд та адаптувати їх до сучасних навантажень. У численних дослідженнях українських науковців розглядаються методи підвищення жорсткості та несної здатності прогонових будов мостів. Зокрема, Ключник та Марочка досліджували вплив поперечних діафрагм та горизонтальних шпренгельних ферм на зменшення подовжніх переміщень балок у зоні головних ферм та підвищення ефективності спільної роботи балок і верхніх поясів ферми у металевих мостових конструкціях [1]. Також українські науковці приділяють увагу методам підсилення прогонових балок із застосуванням композитних матеріалів. Іноземні фахівці також активно вивчають методи підсилення мостових балок, зокрема використання зовнішньої попередньо-напруженої арматури та композитних матеріалів. Так, у дослідженні «Experimental Study on Effects of Additional Prestressing Using Fiber Reinforced Polymers and Strands on Deterioration of PSC Bridge Structure» [2] авторського колективу Kim et al., проведено експерименти на реальних зразках мостових конструкцій із додатковим попереднім напруженням. Результати показали, що метод зовнішнього попереднього напруження є найбільш ефективним для підвищення жорсткості: у діапазоні навантажень 200–400 кН він збільшив жорсткість конструкції майже вдвічі порівняно з не посиленими зразками. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, у відкритих джерелах досі недостатньо висвітлено питання впровадження інноваційних технологій посилення прогонових будов. Зокре-

ма, існують прогалини в детальних дослідженнях ефективності методів зовнішнього попереднього напруження та оптимізації конструктивних рішень для забезпечення довговічності та економічної ефективності в умовах реальної експлуатації.

Формулювання мети дослідження (постановка завдання). Метою дослідження є комплексний аналіз несної здатності типових мостових балок типу ВТП-16 довжиною 16,76 м при їх адаптації до сучасних навантажень класу АК-15 та НК-100.

Виклад основних результатів та їх обґрунтування. Предметом дослідження є прогонові будови, виконані за типовими проєктами, зокрема «ВТП-16». Під час розроблення цих проєктів з метою економії бетону та зниження маси монтажного блоку був зменшений захисний шар бетону. Крім того, для спрощення технології попереднього натягу арматури та зменшення її витрат замість пучків високоміцного дроту, що натягувалися потужними домкратами, було запроваджено технологію натягу окремих дротів (струн) діаметром 3–5 мм. Балки з такою арматурою отримали назву струнобетонних.

Результати обстежень прогонових будов мостів, зведених за цими проєктами, виявили прискорену корозію арматури та руйнування захисного шару бетону. Часто у таких балках виникають обриви струн. Основними причинами цього є: відмова від арматури у пучках, що призвело до значного збільшення площі арматурної сталі у контакті з бетоном, а також зменшення товщини захисного шару бетону.

До недоліків конструктивних рішень проєкту «ВТП-16» належить також улаштування з'єднання діафрагм зварними накладками по закладним деталям у плиті проїзної частини. Внаслідок потрапляння води з проїзної частини ці з'єднання інтенсивно кородують і руйнуються. Аналогічні проблеми виникають і в прогонових будовах за проєктами «ВТП-15» та «ВТП-16», де об'єднання діафрагм у верхній частині виконані поверху полиць: через просочування води відбувається їх корозія і подальше руйнування.

Вказані недоліки зумовлюють обриви дротів у балках і руйнування з'єднань діафрагм. В Україні зафіксовано випадки обвалів балок прогонових будов за проєктами «ВТП-15» і «ВТП-16», у тому числі навіть під дією власної ваги. Найчастіше руйнуються крайні балки прогонів, які інтенсивно звожуються через відведення води з проїзної частини до країв. Недосконала система водовідведення та невдала конструкція тротуарів сприяють потраплянню води на ці балки. Додатковим чинником є застосування протиожеледних матеріалів, хлориди в яких підвищують агресивність вологи та прискорюють корозію [3].

Конструктивні особливості балки за проєктом «ВТП-16» подано на рис. 1.

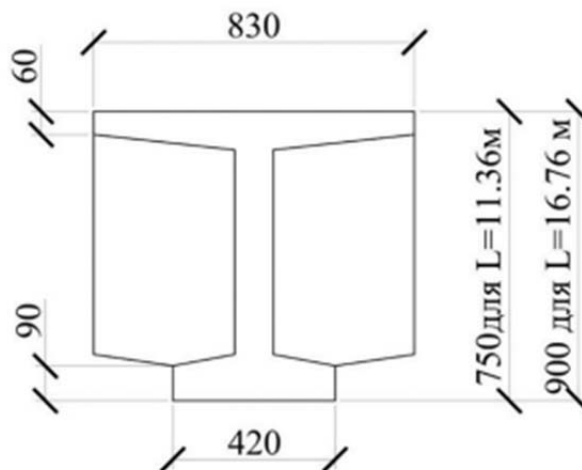


Рисунок 1 – Поперечний переріз балки прогонової будови за типовим проєктом «ВТП-16»

Figure 1 – Cross-section of a span beam according to the typical design «VTP-16»

При розрахунку зусиль в елементах прогонових будов було виконано 3D-модель залізобетонної балки (Рис 2.) в програмному комплексі ЛІРА-САПР та розроблено її розрахункову схему (Рис 3.). Це дозволило відтворити просторову роботу конструкції, врахувати реальні умови закріплення та навантаження – 3D модель в ПК Ліра Сапр).

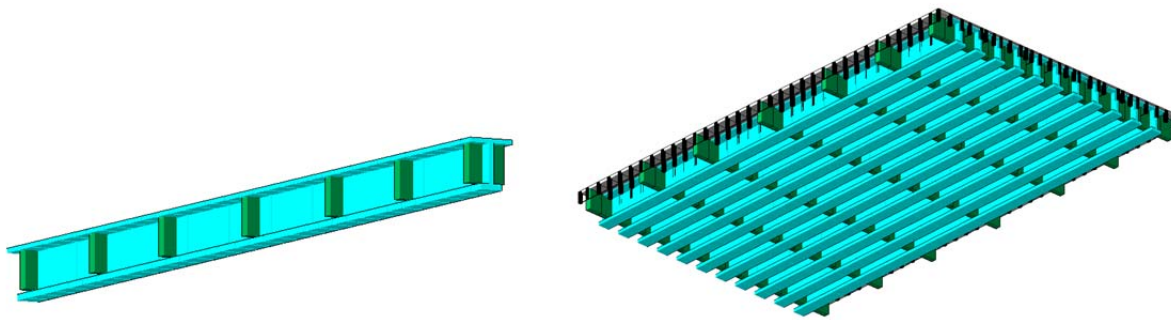


Рисунок 2 – 3D модель в ПК Ліра Сабр
Figure 2 – 3D model in PC Lyra Sapr.

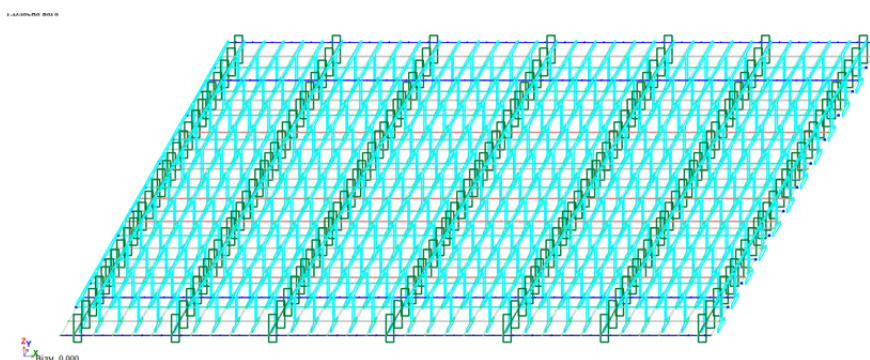


Рисунок 3 – Розрахункова схема в ПК Ліра Сабр
Figure 3 – Calculation scheme in PC Lyra Sapr.

Згідно з типовим проектом, розрахункова несна здатність балки по згинальному моменту становить 122 тс·м. У зазначеній величині використовується одиниця вимірювання «тонна-сила метр», яка застосовувалася в українській інженерній практиці впродовж другої половини XX століття. Це значення визначається як граничний згинальний момент, який конструкція здатна сприймати без втрати працездатності. Параметр характеризує основну міцнісну властивість балки – її здатність чинити опір зовнішньому навантаженню, що викликає згин.

Несна здатність формується за рахунок сумісної роботи бетонної та арматурної складових. При цьому бетон забезпечує сприйняття стискуючих напружень у верхній зоні перерізу, тоді як арматура працює на розтяг у нижній зоні. Важливим є також розташування нейтральної осі, яка визначає розподіл напружень у поперечному перерізі та впливає на ефективність використання матеріалів.

За результатами чисельного моделювання в ПК «ЛІРА-САПР» встановлено, що максимальний згинальний момент від нормативних транспортних навантажень типу Н-30 та НК-80 становить 98 тс·м. Це менше за проектну несучу здатність балки (122 тс·м), визначену згідно з типовим проектом. Розрахунок показує, що балка прогонової будови сприймає саме ті навантаження, для яких вона була розрахована, і має близько 20 % резерву міцності. Це показує, що конструкція відповідала нормам, що діяли на момент її проектування.

Епюри згинальних моментів M_u балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, від поєднання навантажень НК-80 та постійних наведено на Рис. 4.

У той же час, моделювання показало, що при навантаженнях більш високого рівня: АК-15 та НК-100 — максимальний згинальний момент досягає 142 тс·м та 133 тс·м (рис.5 та Рис.6), що перевищує проектну несну здатність балки. Це демонструє, що при таких умовах конструкція не забезпечує нормативну міцність, резерву міцності немає, і виникає ризик утворення тріщин, пластичних деформацій або руйнування. Таким чином, результати показують обмеження експлуатаційної спроможності балок даного випуску при перевищенні проектних навантажень.

РСЗ розрахункові. Оптимізація максимальних значень (Таблиця ДБН_1)
Епюра M_y (розрахунковий переріз)
Одиничні вантажі - 1 т/м

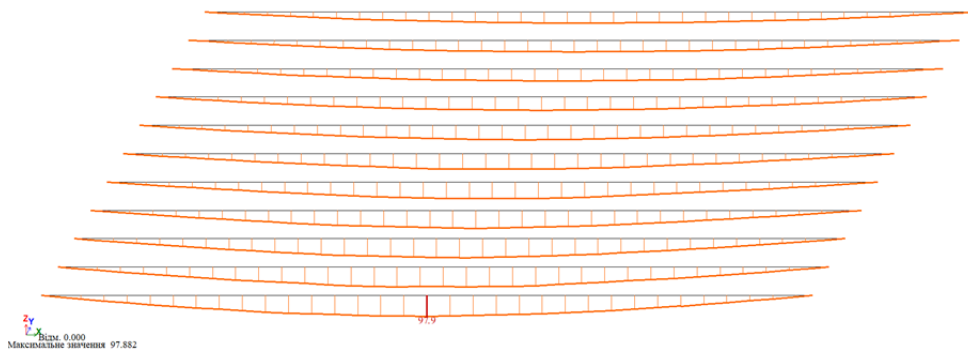


Рисунок 4 – Епюри згинальних моментів M_y балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, НК-80 + постійні (max = 97,9 тс·м)
Figure 4 – Bending moment diagrams M_y of span beams from calculated load combinations, NK-80 + constant (max = 97.9 ts·m)

РСЗ розрахункові. Оптимізація максимальних значень (Таблиця ДБН_1)
Епюра M_y (розрахунковий переріз)
Одиничні вантажі - 1 т/м

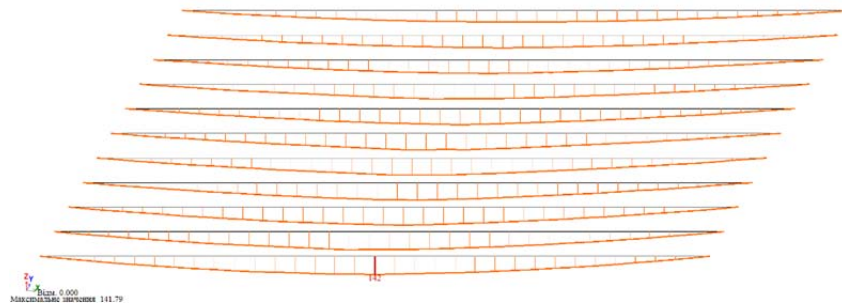


Рисунок 5 – Епюри згинальних моментів M_y балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, АК-15 + постійні (max = 142 тс·м)
Figure 5 – Diagrams of bending moments M_y of span beams from calculated load combinations, АК-15 + constant (max = 142 ts·m)

РСЗ розрахункові. Оптимізація максимальних значень (Таблиця ДБН_1)
Епюра M_y (розрахунковий переріз)
Одиничні вантажі - 1 т/м

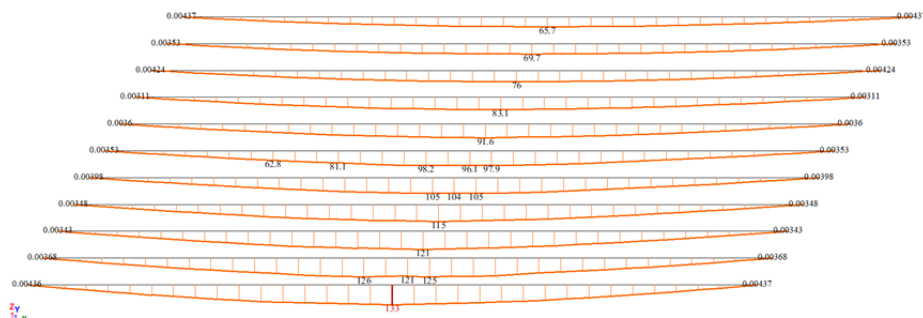


Рисунок 6 – Епюри згинальних моментів M_y балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, НК-100 + постійні (max = 133 тс·м)
Figure 6 – Bending moment diagrams M_y of span beams from calculated load combinations, НК-100 + constant (max = 133 ts·m)

Для забезпечення несної здатності даної типової балки, яка використовується на існуючих мостах на автошляхах України, відносно сучасних транспортних навантажень з метою її підсилення було визначено необхідну додаткову площу арматури за формулою:

Для забезпечення необхідної несучої здатності, яка відповідає сучасним нормативним вимогам, був проведений розрахунок. Результати показали, що для посилення конструкції звичайною арматурою необхідно встановити два стержні діаметром 32 мм. Це рішення дозволяє компенсувати дефіцит міцності, який було виявлено у типових балок.

На рисунку 7 представлено розрахункову модель поперечного перерізу балки прогонової будови за типовим проектом «ВТП-16» із посиленням двома стержнями звичайної арматури.

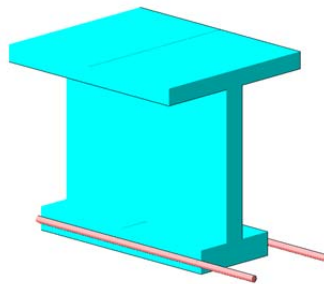


Рисунок 7 – Розрахункова модель поперечного перерізу балки прогонової будови за типовим проектом «ВТП-16» з посиленням двома стержнями звичайної арматури
Figure 7 – Calculation model of the cross-section of a span beam according to the typical design «VTP-16» with reinforcement with two rods of conventional reinforcement

Після данного посилення несна здатність балки відносно навантажень АК-15 забезпечена ($184 \text{ тс} \cdot \text{м} < 193 \text{ тс} \cdot \text{м}$). Несна спроможність перерізу визначається за формулою:

$$M_{\text{гр}} = \begin{cases} R_b \cdot b_{f1} \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) & \text{if } x < h_{f1} \\ R_b \cdot (b_{f1} - b) \cdot h_{f1} \cdot (h_0 - 0,5 \cdot h_{f1}) + R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

де $M_{\text{гр}}$ — граничний момент опору перерізу балки, який визначає її несну здатність;
 R_b — розрахунковий опір бетону на стиск, характеристика міцності бетону, яка враховує коефіцієнти надійності, що залежить від класу бетону;
 b — ширина ребра балки
 h_0 — робоча висота перерізу балки, яка визначається як відстань від стиснутої грані до центру ваги розтягнутої арматури.
 b_{f1} — ширина полиці (верхньої частини);
 h_{f1} — товщина полиці (верхньої частини) балки;
 x — висота нейтральної осі від найбільш стиснутої грані перерізу.

Відповідно до виконаних розрахунків:

$$M_{\text{гр}} = 45,5 \text{ тс} \cdot \text{м}$$

Таким чином, Найбільший розрахунковий згинальний момент від постійних та тимчасових навантажень, що виникає в середині прогону ($M_{\text{гр.пос}}$) був визначений як:

$$M_{\text{гр.пос}} = 122 \text{ тс} \cdot \text{м} + 45 \text{ тс} \cdot \text{м} = 167 \text{ тс} \cdot \text{м} > 142 \text{ тс} \cdot \text{м}$$

Порівняння розрахункового моменту опору посиленої балки з моментом від зовнішніх навантажень показало, що після посилення звичайною арматурою конструкція відповідає вимогам міцності за першою групою граничних станів та здатна безпечно сприймати задані навантаження.

Розрахункове дослідження ґрунтується на застосуванні методу граничних станів, що є основним підходом у сучасному проектуванні залізобетонних конструкцій. Цей метод дозволяє комплексно оцінити роботу прогонових будов як за умовою міцності (перша група граничних станів), так і за умовою експлуатаційної придатності, що включає контроль за деформаціями та тріщиностійкістю (друга група граничних станів).

Для оцінки ефективності запропонованого підсилення балки звичайною арматурою було проведено розрахунок переміщень прогонової будови під дією власної ваги. Розрахункова модель дозволяє визначити деформації балки у вертикальній площині (по осі Z) та оцінити, наскільки введення додаткових стержнів впливає на загальну жорсткість конструкції. На Рис. 8 наведено епюру переміщень для підсиленої балки, де максимальне значення прогину становить 16,7 мм.

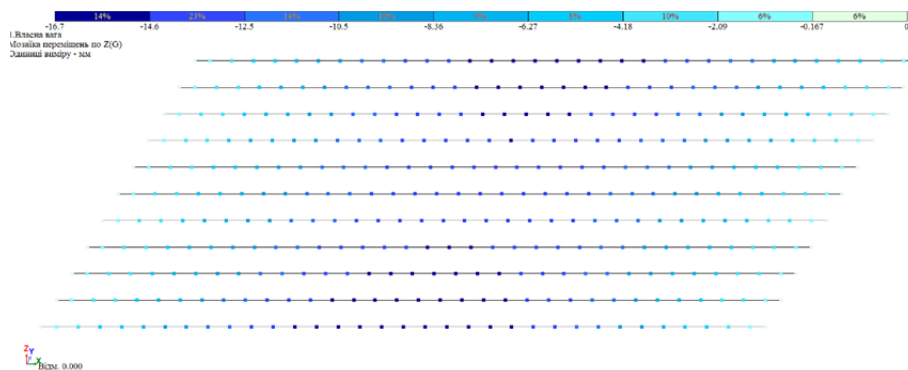


Рисунок 8 – Переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги (max = 16,7 мм) при підсиленні звичайною арматурою
 Figure 8 – Movement of beams of the span structure along the Z axis due to their own weight (max = 16.7 mm) when reinforced with conventional reinforcement

Після підтвердження ефективності посилення балки звичайною арматурою наступним етапом дослідження був розрахунок з використанням попередньо-напруженої арматури, що дозволяє оцінити вплив попереднього натягу на несучу здатність, прогини та тріщиностійкість балки, а також порівняти ефективність обох методів посилення для забезпечення безпечної експлуатації під сучасні підвищені навантаження.

Моделювання такого посилення здійснено шляхом введення в розрахункову схему додаткового зусилля попереднього натягу, яке створює в нижній, розтягнутій зоні бетону постійні стискальні напруження і тим самим зменшує розтягувальні напруження від зовнішніх навантажень.

Для розрахунку використано чотири канати діаметром 15,2 мм, площа поперечного перерізу кожного — 140 мм². Розрахунок передбачає визначення необхідної сили натягу та оцінку впливу попередньо-напруженої арматури на несучу здатність, прогини та тріщиностійкість балки під сучасні навантаження.

За формулою (1) — Граничний момент опору перерізу балки, після підпислення складає:

$$M_{гр} = 60,9 \text{ тс} \cdot \text{м}$$

Таким чином, сумарний граничний момент опору підсиленої балки ($M_{гр.пос}$) попередньо-напруженої арматури був визначений як:

$$M_{гр.пос} = 122 \text{ тс} \cdot \text{м} + 61 \text{ тс} \cdot \text{м} = 183 \text{ тс} \cdot \text{м}$$

При підсиленні балки прогонової будови чотирма попередньо напруженими канатами діаметром 15,2 мм, несуча здатність балки прогонової будови відносно навантажень АК-15 та НК-100 буде забезпечено, $183 \text{ тс} \cdot \text{м} > 142 \text{ тс} \cdot \text{м}$.

Для оцінки тріщиностійкості було виконано відповідний розрахунок, який відповідає вимогам другої групи граничних станів. Цей розрахунок дозволяє визначити, чи виникають тріщини під дією експлуатаційних навантажень та оцінити величину розкриття можливих тріщин, що важливо для забезпечення довговічності та надійності конструкції.

Аналіз показав, що попередньо-напружені канати створюють у нижній, розтягнутій зоні бетону постійні стискальні напруження, які компенсують розтягувальні напруження від зовнішніх навантажень. Завдяки цьому тріщини на стадії посилення та експлуатації не виникають, що підтверджує ефективність застосування попередньо-напруженої арматури для підвищення несучої здатності, обмеження прогинів і забезпечення тріщиностійкості балки під сучасні транспортні навантаження.

Для оцінки впливу підсилення попередньо-напруженою арматурою на деформативність балок прогонової будови було проведено розрахунок переміщень по осі Z під дією власної ваги. На Рис. 9 наведено результати цього розрахунку, де максимальне вертикальне переміщення становить 16,7 мм.

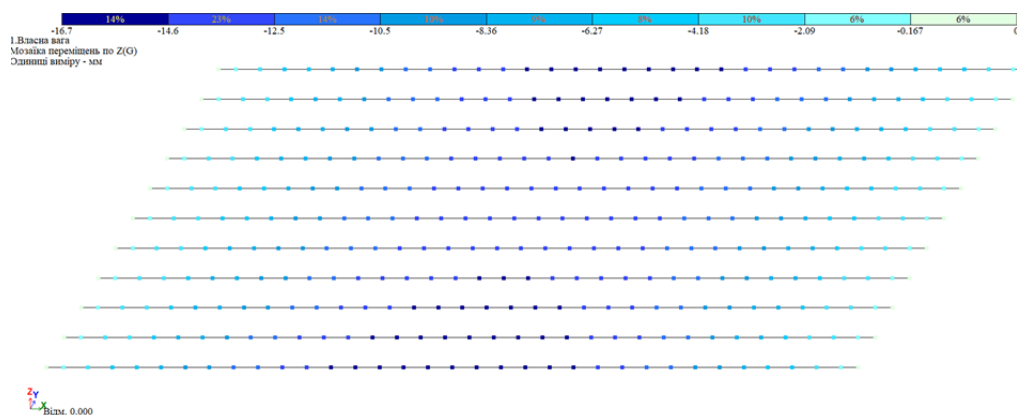


Рисунок 9 – Переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги (макс = 16,7 мм) при підсиленні поперечно-напруженою арматурою
Figure 9 – Movement of beams of the span structure along the Z axis due to their own weight (max = 16.7 mm) when reinforced with transversely tensioned reinforcement

Проведені чисельні дослідження та розрахунковий аналіз напружено-деформованого стану мостових балок типу ВТП-16 під впливом сучасних транспортних навантажень класу АК-15 дозволяють зробити низку важливих висновків щодо ефективності різних методів посилення. Як показав початковий розрахунок, існуюча конструкція балки ВТП-16, спроектована на нормативні навантаження Н-30 та НК-80, демонструє значний дефіцит несучої здатності при сприйнятті сучасних навантажень АК-15 та НК-100. Цей дефіцит становить 43 тс·м, що підкреслює критичну актуальність проблеми модернізації таких споруд. Детальний порівняльний аналіз технічних показників балки до та після застосування різних методів посилення представлено в Таблиці 1. Розрахунок переміщень балок прогонової будови показав, що максимальні прогини під дією власної ваги значно зменшуються після застосування підсилення. У вихідному стані балки прогин складав 21,3 мм. Після підсилення звичайною арматурою він зменшився до 18,8 мм, а при застосуванні попередньо-напруженої арматури — до 14,1 мм. Зменшення прогину свідчить про підвищення жорсткості конструкції та ефективність обраного методу підсилення.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз технічних показників балки ВТП-16 до та після підсилення

Table 1 – Comparative analysis of technical parameters of the VTP-16 beam before and after reinforcement

Показник	Балка без посилення (існуюча)	Балка, посилена звичайною арматурою	Балка, посилена попередньо-напруженою арматурою
Несна здатність перерізу, тс·м	141	193	215
Відповідність вимогам міцності	Не відповідає	Відповідає	Відповідає (з запасом)
Прогин, мм	21,3	18,8	14,1
Тріщиностійкість	Тріщини можливі /наявні	Тріщини можливі	Практично виключена
Збільшення жорсткості	—	Часткове	Значне

Висновок: За результатами проведеного дослідження та чисельного моделювання напружено-деформованого стану мостових балок типу ВТП-16 під впливом сучасних транспортних навантажень класу АК-15, було встановлено, що існуюча типова балка ВТП-16, маючи проектну несну здатність 141 тс·м, не відповідає сучасним вимогам, оскільки розрахунковий згинальний момент від навантажень АК-15 становить 184 тс·м. Це підтверджує значний дефіцит міцності у 43 тс·м, що вимагає компенсації для забезпечення експлуатаційної надійності.

Посилення балки звичайною арматурою (два стержні діаметром 32 мм) підвищує її несну здатність до 193 тс·м, що відповідає вимогам міцності. Однак, цей метод має обмеження: прогин знижується лише до 18,8 мм, а ризик тріщиноутворення залишається, що вказує на потенційні проблеми з довготривалою експлуатацією в агресивних середовищах.

Метод посилення попередньо-напруженою арматурою демонструє вищу ефективність. Несна здатність балки зростає до 215 тс·м, забезпечуючи значний запас міцності. Крім того, прогин суттєво зменшується до 14,1 мм, що свідчить про значне підвищення жорсткості. Найважливішим є те, що цей метод практично усуває утворення тріщин, істотно підвищуючи довговічність балки.

Таким чином, проведений аналіз чітко ілюструє, що метод зовнішнього попереднього напруження є найбільш ефективним рішенням для комплексної адаптації мостових балок ВТП-16 до сучасних експлуатаційних вимог. Він забезпечує не тільки необхідну міцність, але й високу жорсткість та довговічність, що є критично важливим для забезпечення безпечної та тривалої експлуатації мостових споруд.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ключник, С. В., & Марочка, В. В. (2014). Огляд варіантів підсилення та ремонту балок проїзної частини поверхового типу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, (5), 35–40.
2. Kim, T.-K., Jung, W.-T., Park, J.-S., & Park, H.-B. (pik). Experimental Study on Effects of Additional Prestressing Using Fiber Reinforced Polymers and Strands on Deterioration of PSC Bridge Structure (Англійською)
3. Боднар Л. П., Завгородній С. С., Яструбінецький В. Л. Аналіз типових проектів найбільш поширених залізобетонних прогонових будов мостів на автомобільних дорогах України // *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 22. С. 176-186.
4. Стоянович С. В., Полюга Р. І. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної монолітної попередньо напруженої прогонової будови шляхопроводу. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 221–233.
5. ДСТУ 9181:2022 Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2022. 32 с. (Інформація та документація).
6. Лантух-Лященко А.І. Модель визначення надійності прогонової будови в умовах неповної інформації // *Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. – Вип. 62. – К.:2001.
7. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами // *Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Вип. 57. – 1999. – С.183-188.
8. ДБН В.2.3-22:2009 «Мости та труби. Основні вимоги проектування».
9. Борщов В.І., Загора О.Л. Мости і труби. Підручник. Том 2. Залізобетонні мости. Дніпро : Вид-во ДНУЗТ, 2012. 393 с.
10. М. М. Попович, О. С. Миронюк, В. І. Борщов. Підсилення залізобетонних балкових прогінних будов з використанням шпренгелів і попередньо напружених стрижнів.
11. Р В.3.2-03450778-832:2013 Рекомендації з проектування монолітних попередньо-напружених мостів з напруженням на бетон (пост-напружені системи).
12. Thuraichamy Gugesan Suntharavadivel, Thiru Aravinthan Overview of external post-tensioning in bridges.

REFERENCES

1. Klyuchnik, S. V., & Marochka, V. V. (2014). Review of Strengthening and Repair Options for Superstructure Deck Beams. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, (5), 35–40.
2. Kim, T.-K., Jung, W.-T., Park, J.-S., & Park, H.-B. (pik). Experimental Study on Effects of Additional Prestressing Using Fiber Reinforced Polymers and Strands on Deterioration of PSC Bridge Structure.
3. Larysa Bodnar, Serhii Zavorodniy, Vitalii Yastrubynetskyi Analysis of typical designs of the most common reinforced concrete bridge span on the motor roads of Ukraine // *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. Kyiv, 2020. Iss. 22. P. 176-186 [in Ukrainian].
4. Serhii Stoianovych, Roman Poliuga. Research of the stressed and deformed state of a reinforced concrete monolithic pre-stressed runway structure. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. Kyiv, 2023. Iss. 28. P. 221–233 [in Ukrainian].
5. DSTU 9181:2022 Guidelines for assessing and forecasting the technical condition of road bridges. Kyiv, 2022. – 32 p. (Information and documentation).

6. Lantukh-Liashchenko A. I. Model for determining the reliability of a span structure under conditions of incomplete information // Collection «Highways and Road Construction». – Issue 62. – Kyiv, 2001.
7. Lantukh-Liashchenko A. I. Assessment of structural reliability using a Markov stochastic process model with discrete states // Collection «Highways and Road Construction». – Issue 57. – 1999. – P. 183-188.
8. DBN V.2.3-22:2009 Bridges and culverts. Basic design requirements.
9. Borshchov V. I., Zakora O. L. Bridges and culverts. Textbook. Vol. 2. Reinforced concrete bridges. Dnipro: Publishing House of DNUZT, 2012. – 393 p.
10. M. M. Popovych, O. S. Myroniuk, V. I. Borshchov. Strengthening of reinforced concrete girder spans using struts and prestressed rods.
11. R V.3.2-03450778-832:2013 Recommendations for the design of monolithic prestressed bridges with stress applied to concrete (post-tensioning systems).
12. Thuraichamy G, Ganesan S, Suntharavadivel, Thiru Aravinthan Overview of external post-tensioning in bridges.

РЕФЕРАТ

Мінюкова А.Д. Оцінка конструктивної надійності балок прогонових будов ВТП-16 довжиною 16,76 м при адаптації до навантажень класу АК-15 / А.Д. Мінюкова, П. М. Сташук / Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Стаття присвячена дослідженню конструктивної надійності мостових балок ВТП-16 довжиною 16,76 м при адаптації до сучасних навантажень класу АК-15. У роботі проведено аналіз несучої здатності балок у вихідному стані, визначено їх відповідність проєктним нормативам минулих періодів та обґрунтовано необхідність підсилення для забезпечення експлуатаційної надійності в умовах сучасних підвищених навантажень. Додатково виконано математичне моделювання різних варіантів підсилення з використанням як звичайної, так і попередньо-напруженої арматури.

Мета роботи – оцінка несної здатності та конструктивної надійності мостових балок ВТП-16 при дії навантажень класу АК-15, а також визначення ефективних методів підсилення з використанням звичайної та попередньо-напруженої арматури.

Методика – побудова 3D-моделі балки у програмному комплексі ЛІРА-САПР, виконання розрахунків несучої здатності за першою групою граничних станів та розрахунків на тріщиностійкість за другою групою. Досліджено ефективність посилення шляхом введення додаткової звичайної арматури та зовнішньої попередньо-напруженої арматури.

Результати – встановлено, що в початковому стані балки ВТП-16 відповідають проєктним нормативам минулих років (Н-30, НК-80), проте не забезпечують необхідної несної здатності при діях сучасних навантажень (АК-15, НК-100). Розрахунки показали, що посилення балки звичайною арматурою діаметром 32 мм дозволяє забезпечити нормативну міцність, тоді як використання попередньо-напруженої арматури чотири канати діаметром 15,2 мм забезпечує підвищену несучу здатність, зменшення прогинів та відсутність тріщин на стадії експлуатації.

Висновки – результати дослідження підтверджують доцільність підсилення мостових балок ВТП-16 для їх адаптації до сучасних транспортних навантажень. Застосування попередньо-напруженої арматури є найбільш ефективним методом, що дозволяє забезпечити необхідний рівень міцності, жорсткості та тріщиностійкості, підвищуючи надійність та довговічність мостових конструкцій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЗАЛІЗОБЕТОННІ ПРОГОНОВІ БУДОВИ, ДОВГОВІЧНІСТЬ КОНСТРУКЦІЙ, ВТОМНІ ПОШКОДЖЕННЯ, ДОДАТКОВЕ ПОПЕРЕДНЄ НАПРУЖЕННЯ, МЕТОД ЗМІЦНЕННЯ, ЗОВНІШНЄ ПОПЕРЕДНЄ НАПРУЖЕННЯ.

ABSTRACT

Minyukova A.D., Stashuk P.M., Assessment of Structural Reliability of VTP-16 Bridge Beams (16.76 m) under AK-15 Load Adaptation. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article is devoted to the assessment of the structural reliability of VTP-16 bridge beams with a span length of 16.76 m under adaptation to modern traffic loads of class AK-15. The study includes an analysis of the bearing capacity of the beams in their original condition, identification of compliance with the design standards of the period when they were constructed, and justification of the need for strengthening to

ensure operational reliability under current increased loads. Numerical modeling was carried out to evaluate different strengthening approaches, including reinforcement with conventional steel bars and external prestressed tendons. The obtained results demonstrate the efficiency of the proposed strengthening methods and confirm their applicability for extending the service life and safety of existing bridge structures.

Objective – to assess the load-bearing capacity and structural reliability of VTP-16 bridge beams under AK-15 class loads, and to determine effective strengthening methods using conventional and prestressed reinforcement.

Methodology – a 3D model of the beam was developed in the LIRA-SAPR software package, with calculations performed for load-bearing capacity according to the first group of limit states and for crack resistance according to the second group. The effectiveness of strengthening was evaluated by introducing additional conventional reinforcement and external prestressed reinforcement.

Results – it was established that in their initial state, VTP-16 beams comply with the design norms of past years (H-30, NK-80), but do not provide sufficient load-bearing capacity under modern loads (AK-15, NK-100). Calculations showed that strengthening the beams with 32 mm diameter conventional reinforcement ensures normative strength, while the use of four 15.2 mm diameter prestressed strands provides increased load-bearing capacity, reduced deflections, and prevents cracking during operation.

Conclusions – the study confirms the feasibility of strengthening VTP-16 bridge beams to adapt them to modern traffic loads. The use of prestressed reinforcement is the most effective method, ensuring the required levels of strength, stiffness, and crack resistance, thereby enhancing the reliability and durability of bridge structures.

KEYWORDS: REINFORCED CONCRETE BRIDGE STRUCTURES, DURABILITY OF STRUCTURES, FATIGUE DAMAGE, ADDITIONAL PRESTRESSING, STRENGTHENING METHOD, EXTERNAL PRESTRESSING.

АВТОРИ:

Мінюкова Анна Дмитрівна, аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, e-mail: anyminyukov@gmail.com, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, <https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>

Сташук Павло Михайлович, кандидат технічних наук, Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна, e-mail: pavlo.stashuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>

AUTHOR:

Minyukova Anna Dmytrivna, PhD student, Department of Bridges, Tunnels, and Hydraulic Structures, National Transport University, E-mail: anyminyukov@gmail.com, Ukraine, 01010, Kyiv, 1 M. Omelianovycha-Pavlenka St., <https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>

Stashuk Pavlo Mykhailovych, Candidate of Sciences (Engineering), State Enterprise “National Institute for Development Infrastructure” (SE “NIDI”), Kyiv, Ukraine, E-mail: pavlo.stashuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Онищенко А.М., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Мостів, тунелів та гідротехнічних споруд», Національний транспортний університет, Київ, Україна.

Касків В. І., кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури», Київ, Україна.

REVIEWER:

Onyschenko A.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Bridges, Tunnels, and Hydraulic Structures, National Transport University, , Kyiv, Ukraine.

Kaskiv V. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Research, State Enterprise «National Institute for Infrastructure Development», Kyiv, Ukraine.

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ДАНИХ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Миськів С.Б., Національний транспортний університет, Київ, Україна,
sergii.myskiv@gmail.com, orcid.org/0009-0003-3775-9678

Вітер М.Б., кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет,
mbviter@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4109-005X

ANALYSIS OF APPROACHES TO COMPUTER FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION DATA

Mykiv S.B., PhD student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, sergii.myskiv@gmail.com,
orcid.org/0009-0003-3775-9678

Viter M.B., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, National Transport University, Kyiv,
Ukraine, mbviter@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4109-005X

Постановка проблеми.

Прогнозування споживання електроенергії є важливим фактором забезпечення ефективного функціонування сучасних енергосистем. Зростаючий попит на електроенергію, зміни клімату та впровадження нових технологій потребують інноваційних методів аналізу та прогнозування. Побутовий сектор, який займає значну частину загального споживання, вимагає детального аналізу даних з метою розроблення адаптивних моделей, що дозволять своєчасно реагувати на змінні умови ринку та зовнішні фактори. На сьогоднішній день ця тема набуває особливої актуальності також в контексті енергетичної безпеки та оптимізації використання ресурсів. Точні прогнози споживання електроенергії є не лише економічною перевагою для постачальників та споживачів, але й стратегічним ресурсом для планування розвитку енергетичної інфраструктури. В умовах сучасних викликів, таких як нестабільність енергетичних ринків, кліматичні зміни та геополітичні фактори, воєнні дії розробка ефективних методів прогнозування стає ключовим елементом забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору. У статті розглядаються як традиційні підходи (регресійний аналіз, часові ряди), так і сучасні методи машинного навчання, що суттєво підвищують точність прогнозів. Огляд літератури свідчить про активний розвиток алгоритмів, зокрема рекурентних нейронних мереж та градієнтного бустингу, які дозволяють враховувати не лише трендові і сезонні компоненти, а й складні нелінійні залежності між параметрами енергоспоживання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження у сфері прогнозування споживання електроенергії пройшли значну еволюцію протягом останніх десятиліть. Основоположні праці Хіперта та співавторів (2011) [1] заклали теоретичний базис для застосування нейронних мереж у короткостроковому прогнозуванні, проте вже тоді були визначені істотні обмеження цих методів при роботі з нелінійними залежностями.

Подальші дослідження, зокрема роботи Hong та співавторів (2020) [2], продемонстрували суттєві переваги імовірного прогнозування над детерміністичними підходами. Запропоновані ними методики, що поєднують статистичні методи з елементами машинного навчання, дозволили підвищити точність прогнозів на 15-20% порівняно з класичними методами. Варто зазначити, що даний напрям розвивався паралельно з впровадженням інтелектуальних лічильників, що надало дослідникам доступ до даних високої роздільної здатності.

Значний науковий внесок у розвиток методологій прогнозування було зроблено колективом дослідників під керівництвом Hyndman (2018-2022) [3] з Університету Монаша (Австралія), які сконцентрували увагу на розробці комплексних підходів до аналізу даних розумних лічильників. Запропоновані ними методи включають не лише аналіз часових рядів, але й враховують просторові залежності та соціально-економічні фактори.

Останні дослідження в цій галузі демонструють зростаючий інтерес до рекурентних нейронних мереж, зокрема архітектури LSTM та GRU. Ці моделі продемонстрували свою ефективність при моделюванні довгострокових часових залежностей, що є критичним для прогнозування сезонних коливань у споживанні електроенергії. Роботи Rangapuram та колег (2021)

[4] з Amazon Research (США) визначили, що використання LSTM-моделей дозволяє знизити середню абсолютну помилку прогнозу на 8-12% порівняно з традиційними методами.

Необхідно відзначити, що традиційні дослідження у сфері прогнозування електроспоживання поступово зміщуються у напрямку гібридних моделей. Роботи Salinas та співавторів [5] з Amazon Web Services підтверджують ефективність поєднання фізичних моделей енергосистем із методами глибокого навчання, що дозволяє не лише підвищити точність прогнозів, але й забезпечити краще розуміння причинно-наслідкових зв'язків у енергетичних системах.

Значний теоретичний внесок у розуміння властивостей моделей прогнозування зробили дослідження Makridakis [6], які провели масштабне порівняння різних методів прогнозування на стандартизованих наборах даних. Результати їхніх експериментів показали, що складні моделі глибокого навчання не завжди перевершують традиційні статистичні методи, особливо для даних з високою сезонністю та чіткими патернами. Це дослідження підкреслило необхідність ретельного вибору моделі залежно від характеристик конкретного часового ряду та поставленої задачі.

Паралельно розвивалися дослідження методів імовірнісного прогнозування, які замість однієї точкової оцінки надають розподіл можливих значень споживання. Koenker та співавтори [7] з Університету Іллінойса (США) запропонували використання квантільної регресії для моделювання невизначеності прогнозів, що особливо важливо для ринків електроенергії, де точне планування є критичним для балансування попиту та пропозиції.

Формування цілей статті.

Мета статті полягає в аналізі як традиційних статистичних методів, так і сучасних підходів з використанням машинного навчання для прогнозування споживання електроенергії. Завданнями є: визначити переваги та недоліки різних підходів за критеріями точності, надійності та здатності до інтерпретації; систематизувати основні виклики, пов'язані з адаптацією моделей до екстремальних умов; окреслити перспективні напрями розвитку даної галузі, включаючи гібридні моделі та федеративне навчання.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Процес прогнозування починається із збору даних, що включають інформацію з розумних лічильників та інших IoT-пристроїв. Застосування методів попередньої обробки, таких як нормалізація, виявлення та видалення аномалій, є критично важливим для підготовки даних до подальшого аналізу. Як показано в роботах Bottieau [8], якісне попереднє опрацювання даних дозволяє зменшити вплив випадкових коливань та підвищити стабільність прогнозних моделей.

Традиційні статистичні методи, такі як ARIMA (авторегресивна інтегрована модель ковзного середнього) та її сезонні варіанти SARIMA, здобули популярність завдяки простоті використання. Вони моделюють значення часового ряду на основі його попередніх значень та помилок прогнозування.

До недоліків вказаних методів відноситься необхідність попереднього оброблення даних та уточнення сезонних компонентів. Проте, завдяки своїй простоті, ARIMA/SARIMA моделі залишаються у використанні там, де обробляються великі обсяги даних та чітко виражені сезонні ефекти.

З розвитком обчислювальних технологій все більшої популярності набувають методи машинного навчання. Рекурентні нейронні мережі (RNN), зокрема їх варіанти LSTM (Long Short-Term Memory) та GRU (Gated Recurrent Units), здатні моделювати часові залежності значно ефективніше.

Гібридні методи, що поєднують статистичні підходи та машинне навчання, дозволяють інтегрувати зовнішні фактори, такі як погодні умови та соціально-економічні показники. Це є особливо важливим, оскільки вплив температури на енергоспоживання є показовим, демонструючи U-подібну залежність. Мінімальне споживання спостерігається в зоні комфорту, тоді як при екстремальних температурах відбувається різке зростання. Ця залежність графічно представлена на рисунку 1.

Порівняння точності різних моделей часто демонструє перевагу гібридних підходів. На порівняльній діаграмі (рис. 2) показано значення середньоквадратичної помилки (RMSE) для моделей ARIMA, SARIMA, LSTM, GRU та гібридної моделі. Як видно з діаграми, гібридна модель показала найменше значення похибки, що підтверджує ефективність комбінування різних підходів.

Для кількісної оцінки якості моделей використовуються стандартні метрики. До основних метрик, що використовуються для оцінки, входять середня абсолютна помилка (MAE), середня квадратична помилка (MSE) та корінь із середньої квадратичної помилки (RMSE).

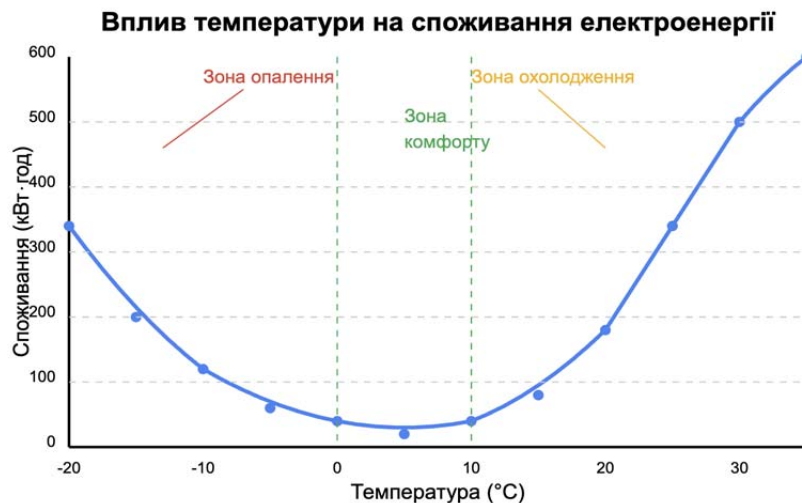


Рисунок 1 – Графік залежності від впливу зовнішніх факторів отриманий за допомогою гібридної моделі та IOT пристроїв
 Figure 1 – Graph of dependence on the influence of external factors obtained using a hybrid model and IOT devices

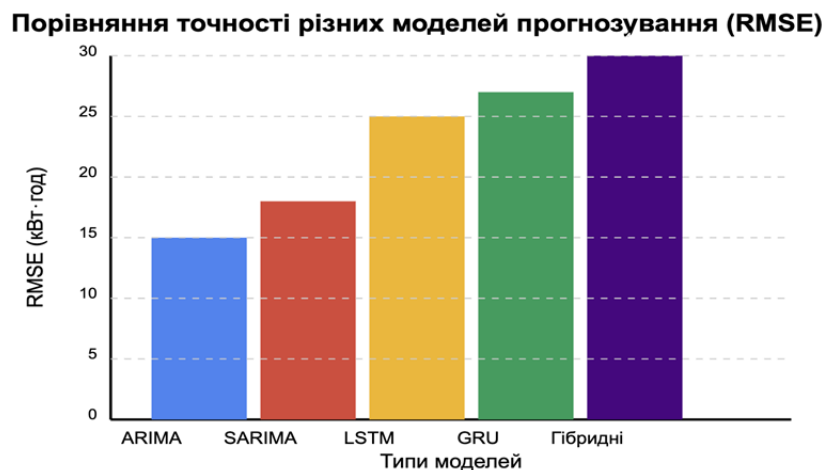


Рисунок 2 – Порівняльна діаграма точності моделей
 Figure 2 – Comparative chart of model accuracy

Українські наукові школи зробили значний внесок у розвиток методів прогнозування електроспоживання, особливо в контексті специфічних умов вітчизняної енергосистеми. Дослідження, проведені в Інституті електродинаміки НАН України під керівництвом академіка Кириленка О.В. [10], зосереджені на розробці адаптивних моделей прогнозування, які враховують нестабільність енергетичного ринку України та структурні зміни в енергетичному секторі.

Велику увагу українські дослідники приділяють проблемам адаптації моделей прогнозування до умов надзвичайних ситуацій. Дослідження Блінова І.В. та Паруса Є.В. [11] присвячені розробці методів прогнозування електроспоживання в умовах значних зовнішніх впливів, включаючи воєнні дії та надзвичайні ситуації. Їхні роботи демонструють ефективність використання ансамблевих методів машинного навчання для забезпечення стабільності прогнозів в умовах невизначеності.

Важливим напрямком досліджень в Україні є також інтеграція прогнозних моделей у системи управління енергоспоживанням. Роботи Терещенко Т.О. та співавторів [12] зосереджені на розробці інтегрованих систем, що поєднують методи прогнозування з алгоритмами оптимізації розподілу енергоресурсів. Запропоновані ними рішення дозволяють не лише прогнозувати споживання, але й оптимізувати режими роботи енергетичного обладнання, що має критичне значення в умовах обмеженості ресурсів.

Науковці національного університету "Львівська політехніка" розробили методики застосування федеративного навчання для прогнозування енергоспоживання в умовах обмеженого

доступу до даних. Їхні дослідження представляють особливий інтерес, оскільки дозволяють забезпечити конфіденційність даних при збереженні високої точності прогнозів.

Практичним аспектам впровадження моделей прогнозування в умовах обмежених ресурсів та специфічних вимог енергетичного сектору України присвячені роботи Мислюка Ю.В. та Панченка В.М. [13]. В них розроблені методи прогнозування для малих енергетичних систем з високою часткою відновлюваних джерел енергії, що особливо актуально в контексті енергетичного переходу та декарбонізації економіки України.

Дослідження, проведені в Харківському національному університеті радіоелектроніки, зосереджені на застосуванні методів глибокого навчання для передбачення використання електроенергії промисловими підприємствами. Роботи Єлісєєвої О.К. та співавторів [9] показують ефективність використання комбінації CNN та LSTM мереж для аналізу часових рядів енергоспоживання з врахуванням виробничих циклів та зовнішніх чинників.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Попри достатньо високу точність прогнозів, моделі на базі глибокого навчання стикаються з проблемою інтерпретованості. Властивість інтерпретованості полягає у здатності моделі обґрунтовувати, як і чому вона приймає те чи інше рішення. Інакше кажучи, це про прозорість внутрішньої логіки моделі для людини. Незважаючи на застосування технік візуалізації та аналізу важливості входних ознак, загальна природа «чорних скриньок» залишається нерозв'язаною проблемою. Розробка інтерпретованих моделей, здатних пояснювати прийняті рішення, є важливим напрямом для майбутніх досліджень.

Дослідження Makridakis та співавторів [6] підкреслюють необхідність розробки моделей, що є інтерпретованими за своєю природою, а не лише доповненими поясненнями постфактум. Вони пропонують використання моделей на основі правил та оптимальних дерев рішень, які забезпечують прозорість процесу прогнозування при збереженні прийнятної точності.

Інтерпретованість моделей набуває особливого значення в контексті регуляторних вимог та забезпечення довіри до систем прогнозування. Енергетичні компанії та мережеві оператори часто не можуть прийняти рішення на основі прогнозів, якщо не розуміють, як ці прогнози були отримані. Тому розробка методів пояснення результатів моделей глибокого навчання та створення гібридних інтерпретованих архітектур є критично важливими для практичного впровадження передових методів прогнозування.

Сучасні моделі аналізу даних зазвичай розробляються для стабільних умов роботи енергосистем. Проте несподівані зміни, такі як воєнні дії, стихійні лиха або кібератаки, можуть призводити до різких змін у патернах споживання. Важливо розробляти адаптивні моделі, які здатні переключатися між режимами «нормального» та «кризового» функціонування, інтегруючи механізми виявлення аномалій в рамках прогнозних алгоритмів.

Аналіз сучасних досліджень дозволяє стверджувати, що розвиток методів прогнозування електроспоживання відбувається у напрямку інтеграції різних підходів та технологій, з особливим акцентом на адаптивність, інтерпретованість та здатність функціонувати в умовах невизначеності. Еволюція методів моделювання електроспоживання характеризується переходом до комплексних рішень та мультимодальних підходів з пріоритетом на ефективність обчислень, робастність (стійкість) моделей та можливість інтеграції різномірних джерел даних в єдину аналітичну систему. Очевидним також є перехід від ізольованих моделей до інтегрованих систем, що поєднують різні підходи та враховують широкий спектр факторів.

Перспективними напрямками подальших досліджень є:

1. Розробка мультимодальних моделей, що інтегрують дані різних типів та з різних джерел. Такі моделі дозволять не лише підвищити точність прогнозів, але й забезпечать краще розуміння факторів, що впливають на енергоспоживання.

2. Впровадження методів федеративного навчання, що дозволить використовувати розподілені дані без порушення приватності та конфіденційності. Це особливо актуально в контексті розвитку розумних мереж та систем розподіленої генерації.

3. Розробка інтерпретованих моделей глибокого навчання, які забезпечать не лише високу точність прогнозів, але й дозволять зрозуміти внутрішню логіку прийняття рішень. Це критично важливо для впровадження таких моделей у виробничі процеси.

4. Створення адаптивних систем, здатних функціонувати в умовах значних структурних змін в енергетичному секторі, що є особливо актуальним у контексті переходу до відновлюваних джерел енергії та декарбонізації економіки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hippert H. S., Pedreira C. E., Souza R. C. Neural networks for short-term load forecasting: A review and evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2011. Vol. 26, No. 1. P. 44–55.
2. Hong T., Pinson P., Fan S. Global energy forecasting competition 2014. *International Journal of Forecasting*. 2020. Vol. 36, No. 3. P. 820–838.
3. Hyndman R. J., Liu X. A., Koehler A. B. Dynamic time warping averaging of time series allows faster and more accurate classification. *IEEE International Conference on Data Mining*. 2018. P. 470–479.
4. Rangapuram S. S., Seeger M. W., Gasthaus J., Stella L., Wang Y., Januschowski T. Deep state space models for time series forecasting. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2021. Vol. 31. P. 7785–7794.
5. Salinas D., Flunkert V., Gasthaus J., Januschowski T. DeepAR: Probabilistic forecasting with autoregressive recurrent networks. *International Journal of Forecasting*. 2022. Vol. 38, No. 3. P. 1181–1196.
6. Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V. Statistical and machine learning forecasting methods: Concerns and ways forward. *PLoS ONE*. 2023. Vol. 13, No. P. 22–30.
7. Koenker R., Bassett G. Quantile regression. *Econometrica*. 2019. Vol. 46, No. 1. P. 33–50.
8. Bottiau J., Hubert L., Mercier Z., Sebastien D., Vallee F. Metaheuristic scheduling of the last mile in smart cities. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 16–26.
9. Єлісеєва О. К., Гринько А. П., Велигура А. В. Прогнозування енергоспоживання промислових підприємств за допомогою глибинних нейронних мереж. *Вісник ХНУРЕ*. 2022. № 4. С. 56–64.
10. Кириленко О. В., Блінов І. В., Парус Є. В. Методи прогнозування режимів електроспоживання в умовах енергоринку України. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 3. С. 59–67.
11. Блінов І. В., Парус Є. В. Застосування ансамблевих методів прогнозування електроспоживання в умовах невизначеності. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. № 60. С. 5–13.
12. Терещенко Т. О., Ямненко Ю. С., Клепач Л. Є. Інтегрована система прогнозування та управління режимами електроспоживання. *Електроніка та зв'язок*. 2021. Т. 95, № 4. С. 17–25.
13. Мислюк Ю. В., Панченко В. М. Прогнозування навантаження для малих енергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 1. С. 26–34.

REFERENCES

1. Hippert, H. S., Pedreira, C. E., & Souza, R. C. (2011). Neural networks for short-term load forecasting: A review and evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 44–55. [in English].
2. Hong, T., Pinson, P., & Fan, S. (2020). Global energy forecasting competition 2014. *International Journal of Forecasting*, 36(3), 820–838. [in English].
3. Hyndman, R. J., Liu, X. A., & Koehler, A. B. (2018). Dynamic time warping averaging of time series allows faster and more accurate classification. *IEEE International Conference on Data Mining*, 470–479. [in English].
4. Rangapuram, S. S., Seeger, M. W., Gasthaus, J., Stella, L., Wang, Y., & Januschowski, T. (2021). Deep state space models for time series forecasting. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 31, 7785–7794. [in English].
5. Salinas, D., Flunkert, V., Gasthaus, J., & Januschowski, T. (2022). DeepAR: Probabilistic forecasting with autoregressive recurrent networks. *International Journal of Forecasting*, 38(3), 1181–1196. [in English].
6. Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. (2023). Statistical and machine learning forecasting methods: Concerns and ways forward. *PLoS ONE*, 13, 22–30. [in English].
7. Koenker, R., & Bassett, G. (2019). Quantile regression. *Econometrica*, 46(1), 33–50. [in English].
8. Bottiau, J., Hubert, L., Mercier, Z., Sebastien, D., & Vallee, F. (2020). Metaheuristic scheduling of the last mile in smart cities. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(1), 16–26. [in English].
9. Yeliseieva, O. K., Hrynko, A. P., & Velyhura, A. V. (2022). Prohnozuvannia enerhospozhyvannia promyslovykh pidpriemstv za dopomohoiu hlybynykh neironnykh merezh [Forecasting of energy consumption of industrial enterprises using deep neural networks]. *Visnyk KhNURE - Bulletin of KNURE*, 4, 56–64. [in Ukrainian].
10. Kyrylenko, O. V., Blinov, I. V., & Parus, Ye. V. (2022). Metody prohnozuvannia rezhymiv elektrospozhyvannia v umovakh enerhorynku Ukrainy [Methods for forecasting electricity consumption

modes in the conditions of the energy market of Ukraine]. *Tekhnichna elektrodynamika - Technical Electrodynamics*, 3, 59–67. [in Ukrainian].

11. Blinov, I. V., & Parus, Ye. V. (2022). Zastosuvannya ansamblevykh metodiv prohnozuvannya elektrospozhyvannya v umovakh nevyznachenosti [Application of ensemble methods for electricity consumption forecasting under uncertainty]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy - Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 60, 5–13. [in Ukrainian].

12. Tereshchenko, T. O., Yamnenko, Yu. S., & Klepach, L. Ye. (2021). Intehrovana systema prohnozuvannya ta upravlinnia rezhymamy elektrospozhyvannya [Integrated system for forecasting and managing electricity consumption modes]. *Elektronika ta zviazok - Electronics and Communication*, 95(4), 17–25. [in Ukrainian].

13. Mysliuk, Yu. V., & Panchenko, V. M. (2021). Prohnozuvannya navantazhennia dlia malykh enerhetychnykh system z vidnovliuvanyimi dzherelamy enerhii [Load forecasting for small energy systems with renewable energy sources]. *Vidnovliuvana enerhetyka - Renewable Energy*, 1, 26–34. [in Ukrainian].

РЕФЕРАТ

Миськів С.Б., Вітер М.Б. Аналіз підходів комп'ютерного моделювання та прогнозування даних споживання електроенергії // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У статті проведено комплексний аналіз методів комп'ютерного моделювання та прогнозування споживання електроенергії, що є критично важливим для забезпечення стабільності та ефективності сучасних енергосистем, особливо в умовах економічної та геополітичної нестабільності.

Об'єкт дослідження – процеси та методи прогнозування споживання електроенергії.

Мета роботи – систематизація, аналіз та порівняння традиційних статистичних підходів (ARIMA, SARIMA) та сучасних методів машинного навчання (LSTM, GRU, ансамблеві моделі) для прогнозування електроспоживання, а також визначення перспективних напрямів досліджень.

Методи дослідження – для досягнення поставленої мети використано методи системного аналізу, моделювання, прогнозування, порівняльного аналізу, узагальнення отриманих даних.

У роботі детально розглянуто переваги та недоліки різних класів моделей. Статистичні методи, хоч і є простими в реалізації, мають обмеження при роботі з нелінійними залежностями. Натомість, моделі машинного навчання, зокрема рекурентні нейронні мережі, демонструють значно вищу точність завдяки здатності враховувати складні часові патерни. Особливу увагу приділено гібридним моделям, що поєднують сильні сторони обох підходів. Окремо описано внесок українських наукових шкіл у розробку адаптивних моделей для кризових умов.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження включають подальший розвиток мультимодальних та інтерпретованих моделей (Explainable AI), впровадження федеративного навчання для роботи з конфіденційними даними та створення систем, адаптивних до переходу на відновлювані джерела енергії.

Результати статті можуть бути корисними для науковців і спеціалістів енергетичної галузі при виборі засобів прогнозування, а також енергетичним компаніям для підвищення точності планування, оптимізації роботи мереж та зниження витрат. Результати даного аналізу можуть бути використані в освітньому процесі при підготовці фахівців відповідних спеціальностей.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, СТАТИСТИЧНІ МОДЕЛІ, ГІБРИДНІ МОДЕЛІ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ.

ABSTRACT

Myskiv S.B., Viter M.B. Analysis of approaches to computer modeling and forecasting of electricity consumption data. Analysis and business planning of the functioning of the Kyiv-Odesa highway on a paid and free basis. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

This article provides a comprehensive analysis of methods for computer modeling and forecasting of electricity consumption, which is critically important for ensuring the stability and efficiency of modern energy systems, especially in conditions of economic and geopolitical instability.

The object of the study is the processes and methods for forecasting time series of electricity consumption.

The purpose of the study is to systematize, analyze, and compare traditional statistical approaches (ARIMA, SARIMA) and modern machine learning methods (LSTM, GRU, ensemble models) for electricity consumption forecasting, as well as to identify promising research directions.

Methods of the study – to achieve this goal, methods of system analysis, comparative analysis, generalization, and synthesis of scientific publications were used.

The paper details the advantages and disadvantages of different model classes. Statistical methods, while simple to implement, have limitations when dealing with non-linear dependencies. In contrast, machine learning models, particularly recurrent neural networks, demonstrate significantly higher accuracy due to their ability to capture complex temporal patterns. Special attention is given to hybrid models that combine the strengths of both approaches and to the contribution of Ukrainian scientific schools in developing adaptive models for crisis conditions.

The results of the article can be used by energy companies to improve planning accuracy, optimize network operations, and reduce costs. The results can also be implemented in the educational process for training specialists in the fields of energy and computer science.

Forecast assumptions regarding the development of the research object include the further development of multimodal and interpretable models (Explainable AI), the implementation of federated learning for working with confidential data, and the creation of systems adaptive to the transition to renewable energy sources.

KEY WORDS: ELECTRICITY CONSUMPTION FORECASTING, COMPUTER MODELING, MACHINE LEARNING, STATISTICAL MODELS, HYBRID MODELS, ENERGY SYSTEMS.

АВТОРИ:

Миськів Сергій Богданович, аспірант, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: sergii.myskiv@gmail.com, orcid.org/0009-0003-3775-9678

Вітер Михайло Богданович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри інформаційних систем і технологій, e-mail: mbviter@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4109-005X.

AUTHORS:

Myskiv Serhii, PhD student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: sergii.myskiv@gmail.com, orcid.org/0009-0003-3775-9678

Viter Mykhailo, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, National Transport University, professor of the Department of information systems and technologies, e-mail: mbviter@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4109-005X.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Грибков С. В., доктор технічних наук, професор, Національний університет харчових технологій, завідувач кафедри інформаційних технологій, штучного інтелекту і кібербезпеки, Київ, Україна.

Зубрецька Н. А., доктор технічних наук, професор. Національний транспортний університет, професор кафедри інформаційних систем і технологій, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Gribkov S. V., doctor of technical sciences, professor, National University of Food Technologies, head of the Department of Information Technologies, Artificial Intelligence and Cybersecurity, Kyiv, Ukraine.

Zubretska N. A., doctor of technical sciences, professor. National Transport University, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Kyiv, Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН КОРОЗІЇ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ ПРИ АВАРІЙНОМУ РУЙНУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО МОСТА

Онищенко А. М., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1040-4530

Коваленко В. В., кандидат технічних наук, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, м. Київ, Україна, vkovdp@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1196-7730

Рикутцев О. І., Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, rykovtsevoleksii@gmail.com, orcid.org/0009-0001-1715-6058

Ковальчук В. В., доктор технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, kovalchuk.diit@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4350-1756

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF CEMENT STONE CORROSION IN THE EMERGENCY DESTRUCTION OF THE DECK STRUCTURE OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE

Onyshchenko A.M., Doctor of Technical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1040-4530

Kovalenko V.V., Candidate of Technical Sciences, Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, vkovdp@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1196-7730

Rykovtsev O.I., Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University, Kyiv, Ukraine, rykovtsevoleksii@gmail.com, orcid.org/0009-0001-1715-6058

Kovalchuk V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Railway Transport Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, kovalchuk.diit@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4350-1756

Постановка проблеми. Корозія бетону є актуальною проблемою у всіх країнах світу. Особливу увагу процесам корозії цементного каменю приділяють для умов експлуатації бетонних труб в якості обсадних для добування газу та нафти. Вплив на бетон високих тисків газу CO₂, нафти при високих температурах призводить до прискореної корозії цементного каменю та втраті його механічних властивостей [1–2].

Однак процес карбонізації бетону, який працює на відкритому повітрі відбувається із швидкістю приблизно 20 мм у 25 років. Зниження міцності бетону в приповерхневому шарі відбувається за рахунок впливу карбонільної кислоти, яка знижує лужність цементного каменю. Дана загально відома проблема виникає виключно в приповерхневих ділянках бетонного масиву. Більш небезпечним видом корозії є лужно-кремнієвокисла корозія цементного каменю, яка відбувається у всьому масиві бетону залізобетонних виробів, конструкцій, споруд.

Проблема лужно-кремнієвокислої корозії бетону в Україні досі не контролюється державними організаціями так, наприклад, за умов введення в 2010 р. ДСТУ Б В. 2.6-145:2010 [3], вимоги цього стандарту не вносяться в проекти будівництва стратегічних інфраструктурних об'єктів, які будуються за кошти державного бюджету, та споруд комунального загального і промислового користування.

Передчасне руйнування бетону після 1–10 років експлуатації в Україні доволі часте явище при тому, що термін служби бетону складає від 50 до 100 років. Вигода від впровадження зазначеного стандарту в проектну документацію усіх будівельних об'єктів є очевидною і дотримання норм цього національного стандарту буде сприяти попередженню передчасних руйнувань бетону. Необхідно також зауважити, що традиційні стандартизовані методи досліджень характеристик сировинних матеріалів дозволяють отримати результати аналізів не раніше ніж за тиждень від їх початку, а швидкість переробки цементу та заповнювачів на бетонних заводах і вузлах значно перевищує можливості лабораторних досліджень. Таким чином, неможливість вчасно отримати результати досліджень викликає проблему забезпечення довговічності бетону конструкцій.

Відновлення економіки України потребує значних закордонних інвестицій, в тому числі приватних інвесторів, які будуть стежити за ефективністю власних інвестицій. Таким чином, застосування

стандарту ДСТУ Б В. 2.6-145: 010 [3] сприятиме ефективному витрачання коштів в будівництві, суттєво підвищить інвестиційну привабливість та ефективність розбудови України.

Аналіз останніх публікацій по проблемі. Довговічність бетону, як основного матеріалу для будівництва інфраструктурних споруд є об'єктом досліджень багатьох вітчизняних авторів, а саме: Пшінька О.М., Рунова Р.Ф., Коваленка В.В., Плугіна А. А. та інші, що відображено у науково-дослідних роботах [4] – [9].

Мостові конструкції витримують значні динамічні навантаження в корозійно-активному середовищі у комплексі із температурними коливаннями. Такі складні умови експлуатації вимагають строгої технологічної дисципліни під час виготовлення та використання мостових конструкцій.

Згідно чинного законодавства в сфері будівництва бетон конструкцій повинен відповідати таким стандартам: ДСТУ: ДСТУ ISO 3696:2003 [10] (ISO 3696:1987, IDT) ДСТУ Б EN12620:2013 [11] ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [3]; ДСТУ Б В.2.7-32-95 [12]; ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [13]; ДСТУ Б В.2.7-71 - 98 [14]; ДСТУ Б В.2.7-75-98 [15]; ДСТУ Б В.2.7-210:2010 [16]; ДСТУ Б EN 197-1:2015 [17]; ДСТУ 9183:22 [18]; ДСТУ EN 197-2:2023 [19]; ДСТУ 8858:2019 [20]. Вміст хлор-іонів у цементобетонах дорожніх не повинен бути більше ніж: 0,2 % від маси цементу для цементобетонів з ненапруженою арматурою та 0,1 % від маси цементу для цементобетонів з напруженою арматурою. Інші не менш важливі вимоги до сировинних матеріалів та бетону наведено в стандартах [21] – [29].

Із проведеного аналізу наукових робіт [1–9] встановлено, що задачі досліджень технічного стану прогонових будов мостів та виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій є актуальними та своєчасними.

Формулювання мети дослідження (постановка завдання). Метою досліджень є виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій через р. Либідь. Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести обстеження конструкцій прогонової будови моста;
- провести експериментальні дослідження із визначення причин аварійного руйнування прогонової будови моста із використанням мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкодженого корозією та цілого бетону конструкцій прогонової будови мосту та опор мосту;
- визначити мікроструктуру та хімічний склад бетону на границі цементний камінь – пісочна частка.

Виклад основних результатів та їх обґрунтування. Проведемо дослідження причин аварійного руйнування мосту через ріку Либідь по Повітрофлотському проспекту в м. Київ. Міст збудовано в 1954 р. з реконструкцією в 1982 р., більшість елементів конструкцій мосту знаходяться в незадовільному стані. Присутнє корозійне розтріскування бетону та руйнування окремих частин бетонного масиву.

Конструкції мостової будови нерівномірно пошкоджені та причини пошкоджень відрізняються: від лужно-кремнієвокислої реакції до прискореного руйнування під дією хімічних реагентів.

Загальний вид пошкоджень наведено на рис. 1. Як видно з рис. 1, а, б на поверхні бетону опор і прогонової будови оголені арматурні прутки. За нормативними документами шар бетону над арматурою не повинен бути меншим за 20 мм задля забезпечення захисту арматури від корозії. Також наявна корозія бетону між ребрами мостової балки. Шар бетону над арматурою зруйновано та спостерігається оголена арматурна решітка.

Незахищена арматурна решітка активно кородує та разом із бетоном втрачає проектну міцність. На поверхню бетону виділяється білява кремнієва рідина, що свідчить про активність процесу лужно-кремнієвокислої реакції між цементним каменем та піском у складі бетону.

Огляд нижньої прогонової частини мосту показав наявність подальшого осипання бетонних брил, нещільного прилягання бетону до арматурної решітки (рис. 1, в).

Макроструктурний аналіз бетону прогонової частини мостових конструкцій показав, що бетонна суміш під час будівництва була якісно укладена в конструкціях мосту. Непошкоджені частини конструкції мають гладку поверхню, яка свідчить про відсутність зовнішніх ознак процесів корозійного розтріскування та відносного збереження міцності основних несучих конструкцій (надалі мікроструктурний аналіз має показати наскільки бетон є дефектним та можливий термін його подальшої експлуатації).



а б в
Рисунок 1 – Загальний вигляд пошкоджень мосту Повітрофлотського проспекту через р. Либідь в м. Київ
Figure 1 – General view of the damage to the Povitroflotskyi Avenue bridge across the Lybid River in Kyiv

Наявність активної корозії балок мостових говорить про необхідність їх заміни. Руйнування огорожень і частини пішохідного проходу мосту відбулося з однієї сторони мосту. Це доводить, що подібна аварійна ситуація відбулася із зовнішніх причин (нанесення, або задування вітром речовини агресивної до цементного каменю бетону).

Таким чином, усі наведені на рис. 1 дефекти прогонових будов моста є результатом дії різних зовнішніх та внутрішніх факторів на бетон споруди.

Аварійне руйнування бетону мостових конструкцій ініційоване різними типами корозії бетону. Переважне значення має лужно-кремнієвокисла корозія, швидкість якої прискорюється активними реагентами. Макроструктурний аналіз виявив наявність виділень кремнієвої рідини із зони прискореного руйнування бетону. Для визначення подальшої активності процесу корозії необхідно встановити гіпсові маяки на тріщини на опорах мосту.

Результат експериментальних досліджень із визначення причин аварійного руйнування прогонової будови моста із дослідженням мікроструктури та хімічного складу. Більш глибоке вивчення причин аварійного руйнування проводили за допомогою дослідження мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкодженого корозією та цілого бетону конструкцій прогонової будови моста та опор моста.

Аналіз хімічного складу цементу, окремих піщаних часток, цементного каменю та продуктів лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні прогонової частини моста і опор проводили із використанням методів скануючої мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу. Результати кількісного аналізу вмісту хімічних елементів, та особливо співвідношень концентрацій хімічних елементів в структурних складових на плоских поверхнях речовин та кристалах (наприклад, кремнієвого гелю, на розколі пісочних часток, масиві цементного каменю) у високому вакуумі з напругою, яка прискорює – 10 кВ, дозволяють виявляти наявність та кількість хімічних елементів з точністю до 0,01 відсотка мас. Що є на рівні, або перевищує точність діючих стандартних методів аналізу. При цьому необхідно відмітити швидкість проведення вказаних випробувань, що дозволяє їх віднести до експрес-методів визначення характеристик матеріалів. Експрес методику важливо поєднувати із застосуванням традиційних методів аналізу, які прописані в відповідних діючих стандартах України.

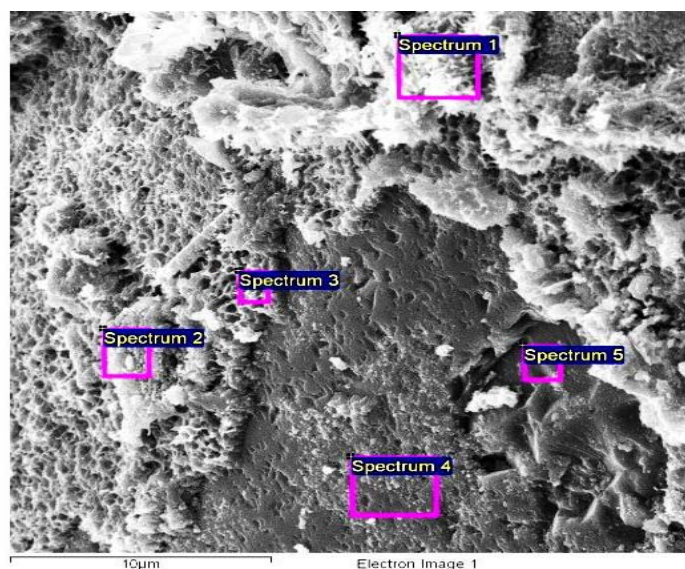
У дослідженні проведено послідовне сканування структурних складових бетону за допомогою енергодисперсійного аналізатора з Оксфордськими програмами кількісного аналізу хімічних елементів. Максимальна точність отриманих результатів мікрорентгеноспектрального аналізу базується на застосованому методі, при якому дослідження зразків проводиться у глибокому вакуумі до 10^{-5} Па.

Від відповідності характеристик цементу нормам стандарту ДСТУ Б.В 2.7-46:2010 залежить структуроутворення цементного каменю, морфологія кристалів, фізико-механічні характеристики та довговічність залізобетонних виробів. При підвищеній лужності цементу (приведений коефіцієнт лужності ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O}$) більший за 0,6 % (мас.)) в процесі гідратації та під час експлуатації мостових конструкцій відбувається реакція хімічної взаємодії луг цементу з кислотними заповнювачами, які

за стандартами не повинні містити більше ніж 50 ммоль/л діоксиду кремнію розчинного в лугах (аморфного кремнезему) ДСТУ Б В.2.6-145:2010.

За державним стандартом ДСТУ Б.В 2.7-46:2010 в портландцементі співвідношення за масою кальцій оксиду до силіцій діоксиду повинно становити не менше ніж 2,0, а масова частка магній оксиду не повинна перевищувати 5 % (мас.), вміст сірки у перерахунку на SO₃ не повинен перевищувати 3,5 % (мас.), але бути більше ніж 1 % (мас.), глини не більше 1,2 % (мас.), вміст хлорид-іонів не повинен перевищувати 0,1 % (мас.).

Середній коефіцієнт приведеної лужності цементу непошкодженого бетону першого зразка становить 1,15 % (мас.), що у 1,9 рази перевищує нормативний показник, визначений ДСТУ Б В.2.6-145:2010 (ГОСТ 31384:2008, NEQ). Результати досліджень наведено на рис. 2.



Spectrum	In stats.	C	O	F	Na	Al	Si	S	Ca	Total
Spectrum 1	Yes	16.40	52.93	1.21	0.20	0.81	5.94	0.46	22.04	100.00
Spectrum 2	Yes	16.96	54.47	1.37	0.00	0.54	4.10	0.38	22.17	100.00
Spectrum 3	Yes	18.40	52.36	0.98	0.14		7.86	0.41	19.85	100.00
Spectrum 4	Yes	11.03	57.92		0.00		29.27		1.77	100.00
Spectrum 5	Yes	9.54	57.13		0.00		31.95		1.38	100.00

Рисунок 2 – Мікроструктура та хімічний склад бетону, % (мас.), на границі цементний камінь–пісочна частка

Figure 2 – Microstructure and chemical composition of concrete, % (wt.), at the cement stone–sand particle boundary.

За розрахунками співвідношення оксиду кальцію до оксиду кремнію в першому дослідженому зразку складає 2,55, що задовольняє вимогам стандарту (рис. 2). Трикальцієвий алюмінат у складі цементу не повинен перевищувати 8 % за масою. У бетоні кількість трикальцієвого алюмінату складає 5,85 % (мас.). Кількість оксиду магнію дорівнює 0,17 % (мас.), що набагато менше граничної кількості у 5 % (мас.). Кількість глини дорівнює 6,6 % (мас.), що не задовольняє вимогам стандарту.

Середнє значення концентрації оксиду сірки складає 4,93 % (мас.). Має місце локальне підвищення концентрації її оксиду до 6,15 % (мас.), що значно перевищує нормативний показник у 3,5 % (мас.). Крім того, значний відсоток вуглецю в структурі цементного каменю усіх зразків свідчить про його карбонізацію, що додатково знижує механічні характеристики бетону в конструкціях мосту. Але точність визначення концентрації вуглецю є дуже низькою і тому ретельний аналіз ступеню карбонізації не проводили. Із загальної практики використання бетону швидкість карбонізації складає 20 мм за 25 років. Для захисту бетону від карбонізації застосовують спеціальні добавки.

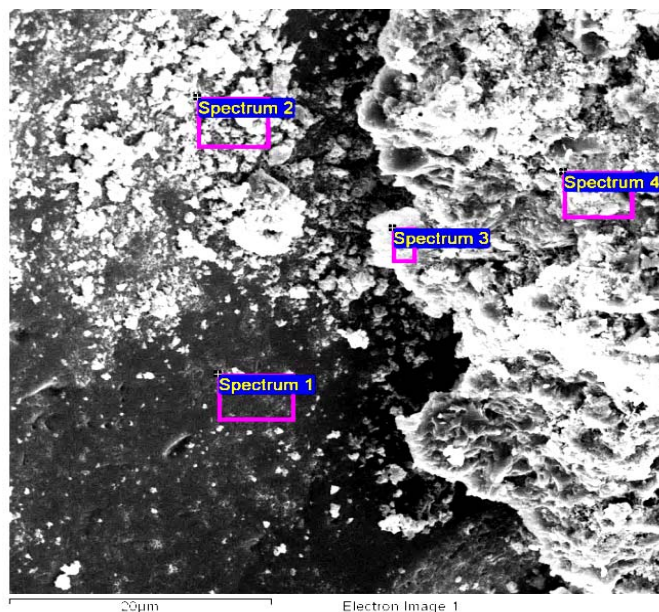
Другий зразок бетону був відібраний на ділянці пошкодженого бетону, що знаходився біля пішохідної частини мосту. Для зазначеного бетону характерно нормативне співвідношення оксидів кальцію та кремнію $k=7,02$, вміст оксиду сірки SO₃- 0,62 % (мас.), глини 1,02 % (мас.), коефіцієнт приведеної лужності цементу 0,18 % (мас.), відсутність з'єднань магнію, але має місце наявність іонів

фтору в кількості 0,71 % (мас.). Цей хімічний елемент називають отрутою для бетонів, бо він сприяє розм'якшенню цементного каменю та мінеральних гелів всередині бетону, разом із кремнієм та натрієм утворює гелеподібні і стрічкоподібні кристалічні структури, що руйнують бетон з середини протягом року.

Наступний зразок відібраний із тріщини на опорній конструкції мосту. Цементний камінь зазначеної ділянки бетону має нормативні показники співвідношення оксидів кальцію та кремнію 3,73, концентрація оксиду магнію дорівнює 0,28 % (мас.), концентрація трикальцієвого алюмінату дорівнює 1,47 % (мас.), оксиду сірки SO_3 0,21 % (мас.), глини – 0,75 % (мас.).

Середня приведена лужність бетону складає 1,7 %, що в 2,8 рази перевищує норму, до того ж в реакційній зоні приведена лужність складає 26,29 % (мас.), що в 43,82 рази перевищує нормативний показник і свідчить про активність корозійних процесів та неможливість їх припинення. До того ж бетон має середню концентрацію фтору 0,86 % (мас.) зі збільшенням концентрації в реакційній зоні до 1,04 % (мас.). Також він містить хлор із середньою концентрацією 0,13 % (мас.) і в реакційній зоні 0,21 % (мас.) (рис. 2). Усі зазначені галогени сприяють прискоренню процесу корозійного руйнування. І кінцевий термін втрати конструкції міцності не перевищує 1 рік від початку дії активаторів корозії – галогенів

На рис. 3 наведено межу пісочної частки з цементним каменем із кремнієвим гелем посередині, який демонструє процес корозії з продукуванням продукту реакції – мінеральним гелем.



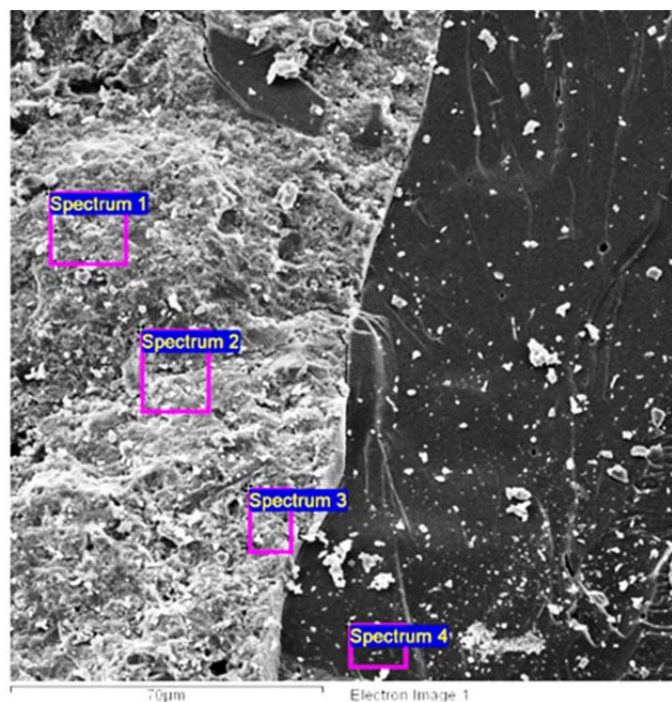
Spectrum	In stats.	C	O	F	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	10.10	56.46				32.51				0.92		100.0
Spectrum 2	Yes	15.99	53.63	1.48	0.23	1.04	23.49		0.47	0.52	3.15		100.0
Spectrum 3	Yes	16.09	54.76	1.08	0.99	6.00	10.29	0.33	1.47	0.85	8.13		100.0
Spectrum 4	Yes	17.17	55.37	1.02	0.44	1.65	4.94	0.30	0.64		16.41	2.07	100.0

Рисунок 3 – Мікроструктура та хімічний склад бетону, % (мас.) , на границі цементний камінь/пісочна частка.

Figure 3 – Microstructure and chemical composition of concrete, % (wt.), at the cement stone/sand particle boundary.

У зоні тріщини підвищена кількість глини 10,96 % (мас.) та трикальцієвого алюмінату 8,5 % (мас.), а також значна концентрація галогенів фтору і хлору 1,19 % (мас.) і 0,86 % (мас.) відповідно.

Із зони непошкодженого бетону отримано наступний зразок для досліджень (рис. 4). Бетон має задовільне співвідношення оксидів кальцію та кремнію, що дорівнює $k=2,69$. Кількість триоксиду сірки дорівнює 1,22 % (мас), трикальцієвий алюмінат (6,11 % (мас.)) і кількість глини (1,2 % (мас.)) не виходять за рамки дозволених стандартом концентрацій.



Spectrum	In stats.	C	O	F	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Total
Spectrum 1	Yes	11.28	42.31		1.01	1.39	6.77	0.53	0.00	1.69	35.02	100.0
Spectrum 2	Yes	13.40	49.06		1.64	0.96	9.76	0.44	0.00		24.73	100.0
Spectrum 3	Yes	10.03	47.36	0.86	1.64	1.02	5.92	0.74	0.00		32.43	100.0
Spectrum 4	Yes	12.30	40.35				47.09	0.00	0.26			100.0

Рисунок 4 – Хімічний склад та мікроструктура структурних складових бетону на непошкодженій ділянці, % (мас.)

Figure 4 – Chemical composition and microstructure of structural components of concrete in the undamaged area, % (wt.)

Середня приведена лужність цементу перевищує нормативні показники в 10,88 раз і становить 6,53 % (мас.). Зазначені обставини у поєднанні з підвищеним вмістом галогенів в реакційній зоні (фтору – 0,86 % (мас.), та хлору 0,26 % (мас.) дозволяють робити висновок про подальше інтенсивне корозійне руйнування бетону до втрати міцності протягом до одного року (рис.4).

Із проведених досліджень встановлено, що для попередження передчасного руйнування бетону інфраструктурних об'єктів необхідно: проводити моніторинг якості бетону існуючих конструкцій та під час будівництва нових об'єктів за експрес-методикою мікроструктурного аналізу за вимогами ДСТУ Б В. 2.6-145: 010. При цьому для наочного спостереження за швидкістю корозійних процесів пропонуємо встановити гіпсовий маяк на тріщину на опорній колонні мосту з боку тротуару.

З метою усунення активного впливу галогенів на структурні перетворення в бетоні, що експлуатується пропонуємо дослідити можливість використання менш агресивних речовин, що менше впливатимуть на корозійні процеси у бетоні і арматурі залізобетонних споруд, але ефективно будуть сприяти очищенню тротуарів та проїзної частини доріг від снігу.

Висновок: За результатами дослідження цементного каменю в конструкціях прогонової будови та опорної аркової колони мосту через р. Либідь по проспекту Повітряних сил України в м. Київ можна зробити наступні висновки:

1. Проведені в роботі дослідження показали невідповідність за реакційною спроможністю цементу та піску досліджуваного бетону вимогам стандартів України.

2. Прогонові та опорні конструкції мосту в яких проходить лужно-кислотна реакція необхідно міняти на нові. Так як, будь-які ремонтні матеріали, що можуть бути нанесені на масив бетону будуть розриватися з причини реструктуризаційних процесів в середині бетону.

3. Наявність підвищеної приведеної лужності цементу призводить до лужно-кислої реакції в бетоні, що експлуатується. Чим більш реакційно спроможний хімічний елемент знаходиться

в бетоні, тим активніше проходить лужно-кремнієвокисла реакція, яка руйнує бетон з середини. Агресивними реагентами – каталізаторами лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні є речовини з вмістом галогенів.

4. Швидкість реакції корозії цементного каменю залежить від наявності агресивних реагентів всередині бетону.

5. У випадку дослідженого бетону необхідно відмітити, що поєднання підвищених концентрацій фтору та хлору сприяє максимальній швидкості зазначеної реакції. Реакція проходить з утворенням нових фаз із вторинного еtringіту, гелевих прошарків, які згодом кристалізуються. Питомий об'єм кристалів перевищує наявний внутрішній об'єм пустот і сприяє утворенню мікро- та згодом макротріщин в бетонній матриці, по-перше, по границях заповнювач–цементний камінь.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Zhang Y. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO₂ corrosion in ultra-high temperature sour gas wells Yihan Zhang, Mingbiao Xu, Jianjian Song, Chunli Wang, Xiaoliang Wang, Bahati Adnan Hamad Construction and building materials, Vol. 323, March 14, 2022, 125879 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125879>.

2. Cheng X.W. Study of interface structure during unidirectional corrosion of oil well cement in H₂S based on computed tomography technology XiaoWei Cheng, KaiYuan Mei, ZaoYuan Li, Xingguo Zhang, XiaoYang Guo Research in Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 55/Issue 41, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b02162>.

3. ДСТУ Б В. 2.6-145:2010 Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 31384-2008, (NEQ).

4. Пшінько О.М., Рунова Р.Ф. Рунова Р.Ф., Руденко І.І., Троян В.В. Роль добавок у зменшенні клінкерної складової під час виробництва товарних бетонних сумішей // М-ли 10-й Міжн. науково-практ. конф. «Дні сучасного бетону». – Запоріжжя: «Планета», 2008. – С. 45 – 59.

5. Рунова Р.Ф., Руденко І. І., Троян В. В. Аналіз факторів, що визначають властивості товарних бетонних сумішей // Матеріали 1-ї Міжнародної науково-практичної конференції «ТОВАРНИЙ БЕТОН — НОВІ МОЖЛИВОСТІ У БУДІВЕЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ». – Харків 2008. – С. 16-43.

6. Шейніч Л. О. Сучасні уявлення про корозію цементного каменю в бетоні під дією води Шейніч Л.О. Ю Колесник, К.К. Пушкарьова, Л.О. Шейніч Автошляховик України 2012 – № 4. – С. 33-37.

7. Рибкін В. В. Дослідження фізико-хімічних властивостей дрібних заповнювачів для виробництва залізобетонних шпал [Текст]/ В.В. Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О.Пшінько, В.П.Лисняк, Л.О.Яришкіна, С.В.Васильєва// Вісник ДНУЗТ Вип. 40 – Д.:В-во ДНУЗТ – С. 140-145.

8. Рибкін В. В. Дослідження експлуатаційної стійкості залізобетонних шпал та основні технологічні прийоми її покращення [Текст] / В.В.Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О.Пшінько, С.В.Коваленко, В.О.Яковлев // Будівництво України. № 4 – К. – 2011 – С.19-23.

9. Рибкін В. В. Деякі аспекти технологічних прийомів виробництва та контролю експлуатаційного ресурсу залізобетонних шпал в Україні та світі[Текст] / В.В.Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О. Пшінько, С.В.Коваленко, В.О.Яковлев // Залізничний транспорт України № 3/4 – К. – 2012 – С. 76-81.

10. ДСТУ ISO 3696:2003 Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння; (ISO 3696:1987, IDT).

11. ДСТУ Б EN12620:2013 Заповнювачі для бетону (EN12620:2002+A1:2008, IDT).

12. ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови.

13. ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загально-будівельного призначення. Технічні умови.

14. ДСТУ Б В.2.7-71 -98 (ГОСТ 8269.0-97) Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань.

15. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови.

16. ДСТУ Б В.2.7-210:2010 Будівельні матеріали. Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови.

17. ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цементи. Частина 1 Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197-1:2011, IDT).
18. ДСТУ 9183:22 Цементи. Загальні технічні умови.
19. ДСТУ EN 197-2:2023 (EN 197-2:2020, IDT) Цемент Частина 2 Оцінювання та перевірка стабільності експлуатаційних характеристик.
20. ДСТУ 8858:2019 Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній Технічні умови.
21. ДСТУ Б В.2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови (ГОСТ 23732-79, MOD);
22. ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Конструкції будинків і споруд. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови.
23. ДСТУ Б.А 1.1-55-94 Природні піски для виробництва будівельних матеріалів Терміни та визначення.
24. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови.
25. ДСТУ Б В.2.7-176:2008 Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови.
26. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
27. ДСТУ Б В.2.7-224:2009 Бетони. Правила контролю міцності.
28. ДСТУ-Н Б А.1.1-83:2008 Система стандартизації та нормування у будівництві. Настанова. Керівний документ В щодо визначення контролю виробництва на підприємстві в технічних умовах на будівельні вироби.
29. ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008 Настанова щодо застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах.

REFERENCES

1. Klyuchnik, S. V., & Marochka, V. V. (2014). Review of Strengthening and Repair Options for Superstructure Deck Beams. Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice, (5), 35–40.
1. Zhang Y. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO₂ corrosion in ultra-high temperature sour gas wells Yihan Zhang, Mingbiao Xu, Jianjian Song, Chunli Wang, Xiaoliang Wang, Bahati Adnan Hamad Construction and building materials, Vol. 323, March 14, 2022, 125879 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125879>.
2. Cheng X.W. Study of interface structure during unidirectional corrosion of oil well cement in H₂S based on computed tomography technology XiaoWei Cheng, KaiYuan Mei, ZaoYuan Li, Xingguo Zhang, XiaoYang Guo Research in Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 55/Issue 41, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b02162>.
3. DSTU B V. 2.6-145:2010 Konstruktsiyi budynkiv i sporud. Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruktsiy vid koroziyi. Zahalni tekhnichni vymohy (HOST 31384-2008, (NEQ).
4. Pshinko O.M., Runova R.F. Runova R.F., Rudenko Y.Y., Troyan V.V. Rol dobavok v umensheny klynkernoy sostavlyayushchey pry proyvodstve tovarnykh betonnykh smesey// Mat. 10-y Mezhd. nauchno-prakt. konf. «Dny sovremennoho betona». – Zaporozhe: «Planeta», 2008. – s. 45 – 59.
5. Runova R.F., Rudenko Y.Y., Troyan V.V. Analiz faktorov, opredelyayushchykh svoystva tovarnykh betonnykh smesey// Materyaly 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyy «TOVARNY BETON — NOVYE VOZMOZHNOSTY V STROYTEL'NYKH TEKHNOLOGIYAKH».- Kharkov 2008. – S.16-43.
6. Sheynich L.O. Suchasni uyavlennya pro koroziyu tsementnoho kamenyu v betoni pid diyeyu vody Sheynich L.O. Yu Kolesnyk, KK Pushkarova, LO Sheynych Avtoshlyakhovyk Ukrayiny 2012 № 4, s. 33-37.
7. Rybkin V.V. Doslidzhennya fizyko-khimichnykh vlastyivostey dribnykh zapovnyuvachiv dlya vyrobnytstva zalizobetonnykh shpal [Tekst]/ V.V. Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O.Pshinko, V.P.Lysnyak, L.O.Yaryshkina, S.V.Vasylyeva// Visnyk DNUZT Vyp. 40 – D.:V-vo DNUZT – S. 140-145.
8. Rybkin V.V. Doslidzhennya ekspluatatsynoyi stiykosti zalizobetonnykh shpal ta osnovni tekhnolohichni pryomy yiyi pokrashchennya [Tekst]/ V.V.Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O.Pshinko, S.V.Kovalenko, V.O.Yakovlyev//Budivnytstvo Ukrayiny. № 4 – K. – 2011 – S.19-23.

9. Rybkin V.V. Deyaki aspekty tekhnolohichnykh pryomiv vyrobnytstva ta kontrolyu ekspluatatsiynoho resursu zalizobetonnykh shpal v Ukraini ta sviti [Tekst] / V.V.Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O. Pshinko, S.V.Kovalenko, V.O.Yakovlyev // *Zaliznychnyy transport Ukrainy* № 3/4 – K. – 2012 – S. 76-81.
10. DSTU ISO 3696:2003 Voda dlya zastosuvannya v laboratoriyakh. Vymohy ta metody pereviryannya; (ISO 3696:1987, IDT).
11. DSTU B EN12620:2013 Zapovnyuvachi dlya betonu (EN12620:2002+A1:2008, IDT).
12. DSTU B V.2.7-32-95 Budivelni materialy. Pisok shchilnyy pryrodnyy dlya budivelnykh materialiv, vyrobiv, konstruktsiy i robit. Tekhnichni umovy.
13. DSTU B V.2.7-46:2010 Budivelni materialy. Tsementy zahalno-budivelnogo pryznachennya. Tekhnichni umovy.
14. DSTU B V.2.7-71 -98 (HOST 8269.0-97) Budivelni materialy. Shchebin i hraviy iz shchilnykh hirsykh porid i vidkhodiv promyslovoho vyrobnytstva dlya budivelnykh robit. Metody fizyko-mekhanichnykh vyprobuvan.
15. DSTU B V.2.7-75-98 Budivelni materialy. Shchebin i hraviy shchilni pryrodni dlya budivelnykh materialiv, vyrobiv, konstruktsiy ta robit. Tekhnichni umovy.
16. DSTU B V.2.7-210:2010 Budivelni materialy. Pisok iz vidsiviv droblennya vyverzhenykh hirsykh porid dlya budivelnykh robit. Tekhnichni umovy.
17. DSTU B EN 197-1:2015 Tsementy. Chstyna 1 Sklad, tekhnichni umovy ta kryteriyi vidpovidnosti dlya zvychaynykh tsementiv (EN 197-1:2011, IDT).
18. DSTU 9183:22 Tsementy. Zahalni tekhnichni umovy.
19. DSTU EN 197-2:2023 (EN 197-2:2020, IDT) Tsement Chastyna 2. Otsinyuvannya ta perevirka stabilnosti ekspluatatsiynykh kharakterystyk.
20. DSTU 8858:2019 Sumishi tsementobetonni dorozhni ta tsementobeton dorozhniy Tekhnichni umovy.
21. DSTU B V.2.7-273:2011 Voda dlya betoniv i rozchyniv. Tekhnichni umovy (HOST 23732-79, MOD).
22. DSTU B V.2.6-209:2016 Konstruktsiyi budynkiv i sporud. Shpaly zalizobetonni poperedno napruzheni dlya zaliznyts koliyi 1520 i 1435 mm. Tekhnichni umovy.
23. DSTU B.A 1.1-55-94 Pryrodni pisky dlya vyrobnytstva budivelnykh materialiv Terminy ta vyznachennya.
24. DSTU B V.2.7-171:2008 Budivelni materialy. Dobavky dlya betoniv i budivelnykh rozchyniv. Zahalni tekhnichni umovy.
25. DSTU B V.2.7-176:2008 Sumishi betonni ta beton. Zahalni tekhnichni umovy;.
26. DSTU B V.2.7-214:2009 Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrolnymy zrazkami.
27. DSTU B V.2.7-224:2009 Betony. Pravyla kontrolyu mitsnosti.
28. DSTU-N B A.1.1-83:2008 Systema standartyzatsiyi ta normuvannya u budivnytstvi. Nastanova. Kerivnyy dokument V shchodo vyznachennya kontrolyu vyrobnytstva na pidpryyemstvi v tekhnichnykh umovakh na budivelni vyroby.
29. DSTU-N B V.2.7-175:2008 Nastanova shchodo zastosuvannya khimichnykh dobavok u betonakh i budivelnykh rozchynakh. Pshinko O.M., Runova R.F., Rudenko I.I., Troyan V.V. The role of additives in reducing the clinker component in the production of ready-mix concrete mixes // *Proc. of the 10th Int. scientific-practical. conf. "Days of modern concrete"*. – Zaporozhye: "Planeta", 2008. – pp. 45 – 59.

РЕФЕРАТ

Онищенко А.М. Дослідження причин корозії цементного каменю при аварійному руйнуванні конструкцій прогонової будови залізобетонного моста / А.М. Онищенко, В.В. Коваленко, О.І. Риковець, В.В. Ковальчук // *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Стаття присвячена проведенню досліджень стану конструкцій мосту Повітрофлотського проспекту через р. Либідь в м. Київ. Для цього застосовано методи вибіркової оцінки залізобетонних

конструкцій прогонової будови мосту, експрес-методики мікроструктурного, мікрорентгеноспектрального та фрактографічного аналізів..

Мета роботи – дослідження та виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій через р. Либідь.

Методика – дослідження причин аварійного руйнування конструкцій прогонових будов моста проводили за допомогою дослідження мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкоджених корозією та цілого бетону моста.

Результати – встановлено, що у складі бетону на границі заповнювачів піску та цементного каменю спостерігається наявність підвищеної кількості лужних металів та галогенів, яка перевищує вимоги державних стандартів у декілька разів. Середнє значення концентрації оксиду сірки складає 4,93 % (мас.). Має місце локальне підвищення концентрації її оксиду до 6,15 % (мас.), що значно перевищує нормативний показник у 3,5 % (мас.). Крім того, значний відсоток вуглецю в структурі цементного каменю усіх зразків свідчить про його карбонізацію, що додатково знижує механічні характеристики бетону в конструкціях мосту..

Висновки – для попередження випадків передчасного руйнування бетону мостів, шляхопроводів, автодоріг пропонуємо проводити моніторинг якості бетону існуючих конструкцій та під час будівництва нових об'єктів за експрес-методикою мікроструктурного аналізу, а також для наочного спостереження за швидкістю корозійних процесів слід встановити гіпсовий маяк на тріщину на опорній колонні моста з боку тротуару.

Для усунення активного впливу галогенів на структурні перетворення в бетоні, що експлуатується пропонуємо дослідити можливість використання менш агресивних речовин, які менше впливатимуть на корозійні процеси в бетоні і арматурі залізобетонних споруд, але ефективно будуть сприяти очищенню тротуарів та проїзної частини доріг від снігу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПРОГОНОВІ БУДОВИ МОСТІВ, БАЛКОВІ МОСТИ, БЕТОН, КОРОЗІЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ, МІКРОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ, МІКРОРЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, ЛУЖНО-КРЕМНІЄВОКИСЛА РЕАКЦІЯ, АВАРІЙНЕ РУЙНУВАННЯ, ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ.

ABSTRACT

Onyshchenko A.M., Kovalenko V.V., Rykovtsev O.I., Kovalchuk V.V. Investigation of the Causes of Cement Stone Corrosion in the Event of Emergency Failure of the Superstructure of a Reinforced Concrete Bridge. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article is dedicated to the investigation of the condition of the bridge structures on Povitruflotsky Avenue over the Lybid River in Kyiv. To this end, methods of selective assessment of reinforced concrete superstructure elements were applied, along with express techniques for microstructural, micro-X-ray spectral, and fractographic analyses.

Objective – To investigate and identify the causes of the emergency failure of bridge structures over the Lybid River.

Methodology – The causes of the emergency failure of the bridge superstructure were studied by examining the microstructure and chemical composition of samples of concrete damaged by corrosion as well as intact concrete from the bridge.

Results – It was found that the concrete at the interface between sand aggregates and cement stone contains an elevated amount of alkali metals and halogens, exceeding national standard requirements several times. The average sulfur oxide concentration is 4.93% by mass. Localized increases in its concentration reach 6.15% by mass, significantly exceeding the regulatory limit of 3.5% by mass. In addition, a significant carbon content in the cement stone structure of all samples indicates its carbonation, which further reduces the mechanical properties of the concrete in the bridge structures.

Conclusions – To prevent premature concrete failure in bridges, overpasses, and highways, it is recommended to monitor the quality of concrete in existing structures and during the construction of new facilities using express microstructural analysis methods. For visual monitoring of corrosion rates, it is suggested to install a gypsum marker on cracks in the bridge support columns on the sidewalk side.

To mitigate the active influence of halogens on structural transformations in concrete in service, it is proposed to investigate the possibility of using less aggressive substances that will have a lower impact on corrosion processes in concrete and reinforcement of reinforced concrete structures while still effectively assisting in the removal of snow from sidewalks and roadways.

KEYWORDS: BRIDGE SUPERSTRUCTURES, BEAM BRIDGES, CONCRETE, CEMENT STONE CORROSION, MICROSTRUCTURAL ANALYSIS, MICRO-X-RAY SPECTRAL ANALYSIS, ALKALI-SILICA REACTION, EMERGENCY FAILURE, CONCRETE DURABILITY PREDICTION.

АВТОРИ:

Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Коваленко Валентина Володимирівна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства НАН України, вул. Омеляна Пріцака (Кржижановського), 3, Київ, Україна, 03142, e-mail: vkovdp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1196-7730>

Риковцев Олексій Ігорович, аспірант кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010, e-mail: rykovtsevoleksii@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0001-1715-6058>

Ковальчук Віталій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри залізничного транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: kovalchuk.diit@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

AUTHOR:

Artur Onyshchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Bridges and Tunnels National Transport University Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Valentyna Kovalenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine Omelyana Prytsaka (Kryzhizhanovskogo) str., 1, Kyiv, Ukraine, 03142, e-mail: vkovdp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1196-7730>

Oleksii Rykovtsev, Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-mail: rykovtsevoleksii@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1715-6058>

Vitalii Kovalchuk, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Railway Transport Lviv Polytechnic National University S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: kovalchuk.diit@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Тютюкін О. Л., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Касків В. І., кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури», Київ, Україна.

REVIEWER:

Tyutkin O. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine.

Kaskiv V. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Research, State Enterprise «National Institute for Infrastructure Development», Kyiv, Ukraine.

МЕТОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА КІЛЬЦЕВИХ РОЗВ'ЯЗКАХ

Петрович В.В., кандидат технічних наук, Національного транспортного університету, Київ, Україна, petrovichvv60@ukr.net, orcid.org/0000-0003-0422-2535

Виговська І.А., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, i.vyhovska2609@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1426-9863

Ткаченко Д.А., Національний транспортний університет, Київ, Україна, avtomag111@gmail.com, orcid.org/0009-0001-0788-5927

METHODS FOR IMPROVING TRAFFIC MANAGEMENT AT ROUNDABOUTS

Petrovych V.V., Candidate of Technical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, petrovichvv60@ukr.net, orcid.org/0000-0003-0422-2535

Vyhovska I.A., Candidate of Technical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, i.vyhovska2609@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1426-9863

Tkachenko D.A. National Transport University, Kyiv, Ukraine, avtomag111@gmail.com, orcid.org/0009-0001-0788-5927

Постановка проблеми. Зростання автомобілізації та інтенсивності руху в Україні зумовлює необхідність пошуку ефективних методів управління дорожнім рухом. Особливо гостро ця проблема постає у великих містах, де є перехрестя з вузькими місцями. Одним із ефективних рішень для підвищення пропускної здатності є кільцеві розв'язки, які, завдяки своїй геометрії, знижують швидкість транспортних потоків та зменшують кількість конфліктних точок.

Разом із тим, класичні кільцеві розв'язки не завжди здатні забезпечити необхідний рівень пропускної здатності мережі у випадках високої інтенсивності руху, зокрема при значному обсязі правоповоротних транспортних потоків. У таких умовах ефективним рішенням є віднесені правоповоротні з'їзди, які дозволяють частково винести транспортний потік за межі кільця. Це не лише зменшує навантаження на кільцеву розв'язку, а й підвищує швидкість та безперервність руху.

Застосування віднесених правоповоротних з'їздів активно використовується у світовій практиці дорожнього проектування, проте в Україні ця технологія перебуває на стадії поступового впровадження. Окремі приклади можна знайти у Львові та Києві, де такі рішення інтегруються у модернізацію транспортної інфраструктури. Враховуючи перспективи подальшого розвитку транспортної системи України, дослідження ефективності, переваг і недоліків віднесених з'їздів має важливе практичне значення.

Аналіз останніх досліджень

Дослідження [1] присвячене аналізу безпеки руху на розв'язках в одному рівні. Попри значний ріст автомобільного парку та високу кількість ДТП (дорожньо – транспортних пригод) на перехрестях, впровадження кільцевих розв'язок є ефективним інструментом для підвищення безпеки. У роботі використано метод статистичної обробки даних для аналізу причин виникнення ДТП. Зокрема, у вступній частині наведено дані, що порушення правил проїзду перехресть займає третє місце серед причин ДТП з постраждалими в Україні. Дослідження підтверджує загальновизнану в усьому світі ефективність кільцевих розв'язок як інструменту підвищення безпеки дорожнього руху.

Дослідження [2] присвячене аналізу безпеки дорожнього руху на перехрестях. Основна увага сфокусована на перехрестях в Нідерландах, де близько третини всіх смертей на дорогах трапляється саме на перехрестях. У межах міст ця цифра сягає половини всіх дорожньо-транспортних пригод. Особливо вразливими учасниками руху є велосипедисти та водії електросамокатів. Кільцеві розв'язки є найбезпечнішим типом перехресть.

Технічний звіт [3] наголошує на важливості застосування принципів проектування, що враховують особливості як односмугових, так і багатосмугових кільцевих розв'язок. У звіті проаналізовано переваги кільцевих розв'язок порівняно з традиційними перехрестями, регульованими світлофорами або знаками «STOP».

У роботі [4] розглянуто рекомендації щодо елементів поперечного профілю, геометричних параметрів, проектування перехресть, велосипедних та пішохідних об'єктів, а також шумозахисних споруд.

У статті [5] автори досліджують транспортну ситуацію у словацькому місті Глоговець. Використовуючи програму Aimsun, вони змоделювали роботу існуючого малого кільця, варіанта зі світлофорним регулюванням та турбокільця. Результати показали, що турбокільце має найкращі показники пропускної здатності, значно знижує затримки (на понад 68%), кількість зупинок (на понад 73%) і час у дорозі (понад 22%). Крім того, цей тип перехрестя сприяє зменшенню викидів шкідливих речовин та економії палива. Автори підкреслюють, що впровадження турбокільця є перспективним рішенням для інтенсивних транспортних потоків, поєднуючи безпеку, ефективність і позитивний вплив на довкілля.

Метою роботи є аналіз функціональних можливостей віднесених правоповоротних з'їздів, оцінка їх переваг і недоліків, а також формування рекомендацій щодо їх впровадження з урахуванням безпеки всіх учасників руху.

Виклад основного матеріалу дослідження. Кільцеві розв'язки є фундаментальним елементом сучасної дорожньої мережі, призначеним для ефективного та безпечного розподілу транспортних потоків з різних напрямків. Завдяки специфічній геометрії вони зменшують швидкість в'їзду на перехрестя, що суттєво підвищує безпеку руху. Крім того, кільцеві розв'язки часто вважаються ефективнішими за класичні світлофорні перехрестя, адже забезпечують безперервність руху та скорочують час затримок.

Однак, зі зростанням інтенсивності руху, їх ефективність знижується. На в'їздах починають утворюватися затори, а збільшення кількості конфліктних точок веде до зниження пропускної здатності.

Для вирішення цих проблем застосовують віднесені правоповоротні з'їзди. Це інноваційне рішення дозволяє вивести транспортний потік, що повертає праворуч, з основного кільця, тим самим зменшуючи навантаження на ключові в'їзди. Цей підхід є особливо актуальним на ділянках із великою інтенсивністю правоповоротного руху транспортних потоків.

Впровадження віднесених правоповоротних з'їздів має низку переваг та недоліків.

До переваг можна віднести:

1. Перенаправлення транспортного потоку, який повертає праворуч, зменшення кількості автомобілів на кільці, що дозволяє збільшити його пропускну здатність.
2. Рух автомобілів, що повертають праворуч, здійснюється поза основним кільцевим потоком, що запобігає утворенню заторів на в'їздах, особливо важливо в години пік.
3. Окремі смуги для правого повороту мінімізують кількість конфліктних точок, що значно знижує ризик виникнення дорожньо-транспортних пригод.
4. Водії можуть здійснити поворот без необхідності зупинки чи суттєвого зниження швидкості, що сприяє безперервному та зручному руху.

До недоліків можна віднести наступне:

1. Для будівництва віднесених з'їздів потрібна значна додаткова земельна ділянка, що може бути проблематичним в щільній міській зоні.
2. Необхідність врахування додаткових факторів (радіусів кривих, перехідно-швидкісні смуги, огороження).
3. Витрати на будівництво і подальше утримання.
4. Погіршення умов для пішоходів та велосипедистів через збільшення довжини переходів і підвищену швидкість руху автомобілів.
5. Додаткові витрати на утримання, ремонтування.

В Україні реалізація віднесених правоповоротних з'їздів поки, що перебуває на стадії окремих ініціатив та проєктів. Відомо, що такі з'їзди є частиною загального вдосконалення транспортної інфраструктури, спрямованої на зниження заторів і підвищення безпеки руху.

Впровадження таких технологій сприяють оновленню транспортних програм у великих містах України.

Наприклад у Львівській області на Кільцевій дорозі поблизу перетину з вулицею Городецькою передбачається використання додаткових смуг, які служитимуть окремими правоповоротними з'їздами. Це один із перспективних проєктів, спрямованих на зменшення навантаження на транспортний вузол. Один такий з'їзд збудували в м. Львів на перехресті вулиць Стрийська – Наукова у напрямку з Наукової до Стрийської [6].

У Києві відбуваються активні роботи з модернізації кільцевих розв'язок. Наприклад, облаштований кільце на перехрестях вулиць Вербової та Марка Вовчка та інших, де досліджується ефективність покращення пропускної здатності за рахунок окремих з'їздів [7].

В цілому у 2021-2022 рр. Україна на державному рівні реалізовувала Державну програму підвищення рівня безпеки дорожнього руху, в тому числі будівництво кільцевих розв'язок, але з війною дана програма призупинена. Хоча конкретні дані про віднесені правоповоротні з'їзди не завжди деталізовані, такі проекти можуть бути інтегровані для вирішення локальних транспортних проблем.

Існує два основних концептуальних підходи до проектування віднесених правоповоротних з'їздів, які є ключовим елементом управління транспортними потоками на кільцевих розв'язках [10].

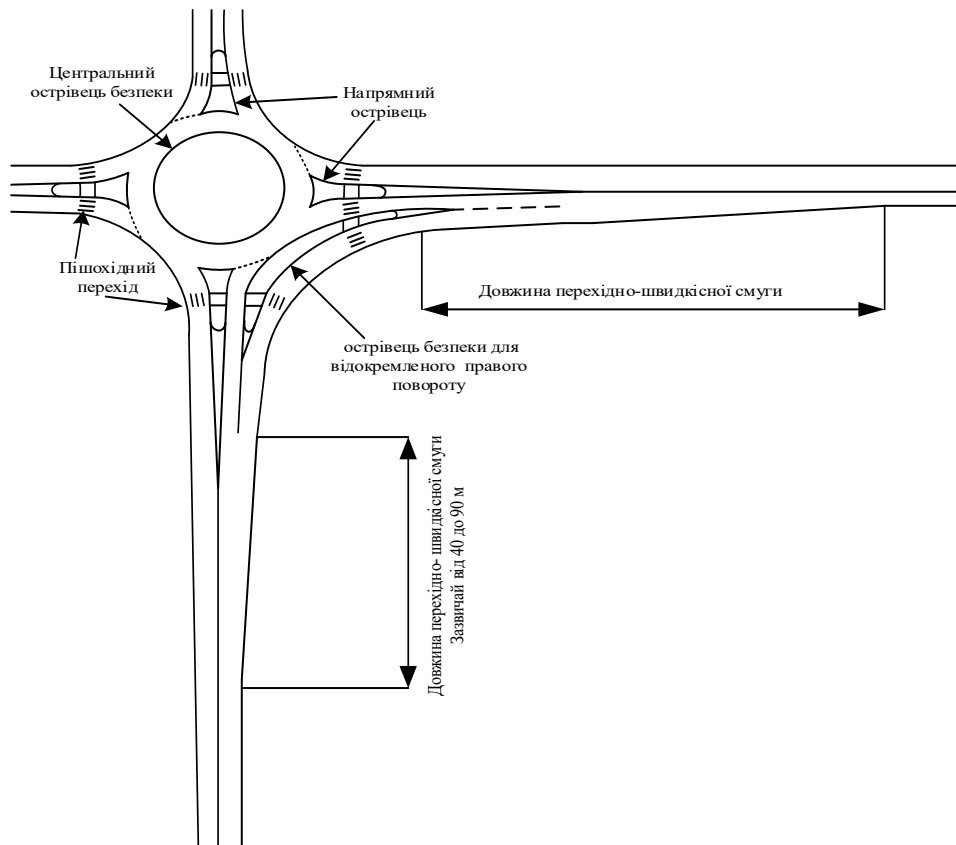


Рисунок 1 – Приклад розташування відокремленого правоповоротного з'їзду з перехідно-швидкісними смугами

Figure 1 – Example of the layout of a separated right-turn exit with acceleration-deceleration lanes

Перший варіант полягає в облаштуванні відокремленої смуги, що проходить паралельно основній дорозі на достатній відстані (рис.1). Ця смуга призначена для автомобілів, що повертають праворуч, дозволяючи їм відокремитися від основного потоку, знизити швидкість та безпечно здійснити маневр. Транспортні засоби, що мають намір повернути праворуч, переміщуються на цю окрему смугу заздалегідь. Це запобігає їхньому заїзду на кільце, що значно розвантажує основний потік. Потім вони виконують поворот, минаючи зону конфлікту на кільцевій розв'язці. Такий підхід реалізується за допомогою перехідно-швидкісних смуг, які забезпечують плавне гальмування для виїзду та розгін для з'єднання з наступним потоком. Це дозволяє водіям безпечно змінити швидкісний режим, мінімізуючи ризик зіткнень. Цей варіант особливо ефективний у місцях із високою інтенсивністю руху та значним обсягом правоповоротного трафіку. Він забезпечує безперервність руху і значно підвищує пропускну здатність всієї розв'язки.

Другий варіант полягає в забезпеченні регульованого в'їзду на суміжну смугу (рис.2). Його ключова особливість полягає у створенні спільної смуги руху, яка функціонує як перед кільцевою розв'язкою, так і після неї. Цей варіант може бути ефективним у випадках, коли немає достатнього простору для створення повноцінних перехідно-швидкісних смуг. Замість повного відокремлення правоповоротного руху транспортних потоків, цей підхід передбачає, що автомобілі, які повертають праворуч, використовують одну й ту саму смугу, що й автомобілі, які виїжджають з кільця. В'їзд на цю смугу, як і виїзд з неї, може бути регульованим з використанням засобів організації дорожнього

руху (дорожня розмітка, дорожні знаки, світлофорні об'єкти) для забезпечення безпечного злиття потоків.

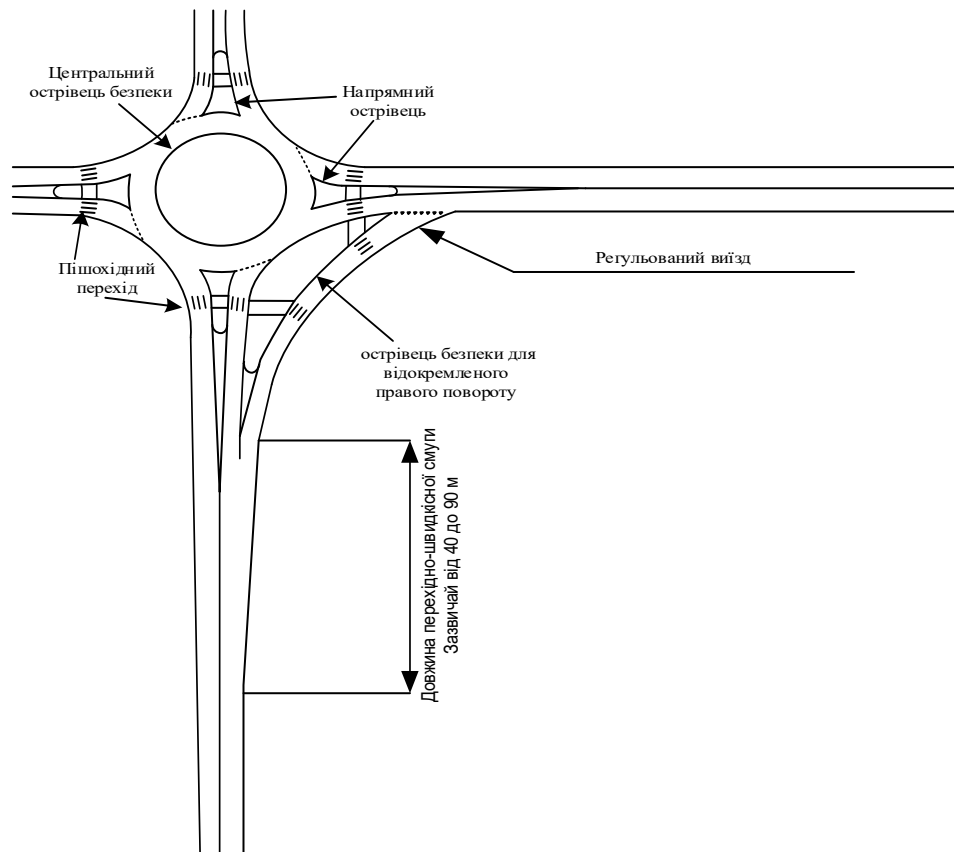


Рисунок 2 – Приклад розташування відокремленого правоповоротного з'їзду з регульованим виїздом
Figure 2 – Example of the layout of a separated right-turn exit with a signal-controlled entry.

Кожен з розглянутих варіантів проектування віднесених правоповоротних з'їздів має свої переваги та недоліки, що визначають їх доцільність залежно від конкретних умов.

Варіант 1 (рис. 1) з перехідно-швидкісними смугами забезпечує кращі експлуатаційні характеристики для автомобільного транспорту. Він дозволяє водіям здійснювати маневр без значного зниження швидкості, що підвищує загальну пропускну здатність та ефективність руху. Однак, цей підхід вимагає значної земельної ділянки для будівництва та смуги відведення. Крім того, наявність смуг розгону може бути проблематичною для велосипедистів, оскільки вони змушені рухатися поруч з автомобілями, що набирають швидкість.

Варіант 2 (рис. 2) з регульованим в'їздом є більш компактним і вимагає менше місця, що робить його привабливим для щільної міської забудови. Цей варіант загалом безпечніший для пішоходів та велосипедистів. Оскільки контроль пропускну здатності на кінці смуги сповільнює автомобілі, це створює більш комфортні умови для руху вразливих учасників дорожнього руху. Тому цей варіант є рекомендованим для міських районів, де переважають пішоходи та велосипедисти.

Порівняльна характеристика варіантів віднесених правоповоротних з'їздів наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика варіантів віднесених правоповоротних з'їздів
Table 1 – Comparative characteristics of separated right-turn exit options.

Характеристика	Варіант 1 (перехідно-швидкісні смуги)	Варіант 2 (регульований виїзд)
Експлуатаційна ефективність	Вища (для автомобілів)	Нижня (для автомобілів)
Вимоги до площі	Значні	Менші
Безпека для пішоходів/велосипедистів	Нижча (через високу швидкість)	Вища (через зниження швидкості)
Доцільність	За межами міст, на ділянках з високою інтенсивністю руху	У міських районах з високою інтенсивністю руху пішоходів та велосипедистів

Крім того, треба обов'язково врахувати що в першому, що в другому варіанті відокремлення окремого правоповоротного з'їзду від основного потоку на або з кільця здійснюється двома варіантами, а саме: розділення за допомогою дорожньої розмітки або острівців безпеки (рис 3).

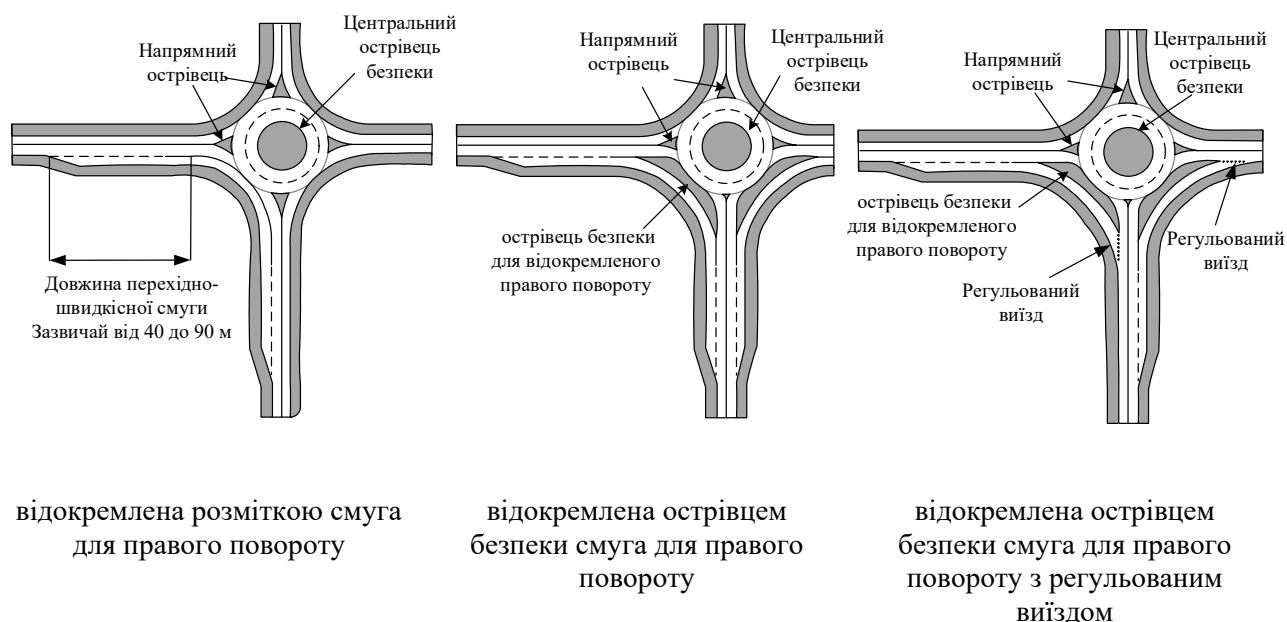


Рисунок 3 – Кільцеві розв'язки з відокремленим віднесеним правим поворотом
Figure 3 – Roundabouts with separated channelized right-turns.

Ось основні рекомендації з проєктування правоповоротних з'їздів на кільцевих розв'язках рис. 4.

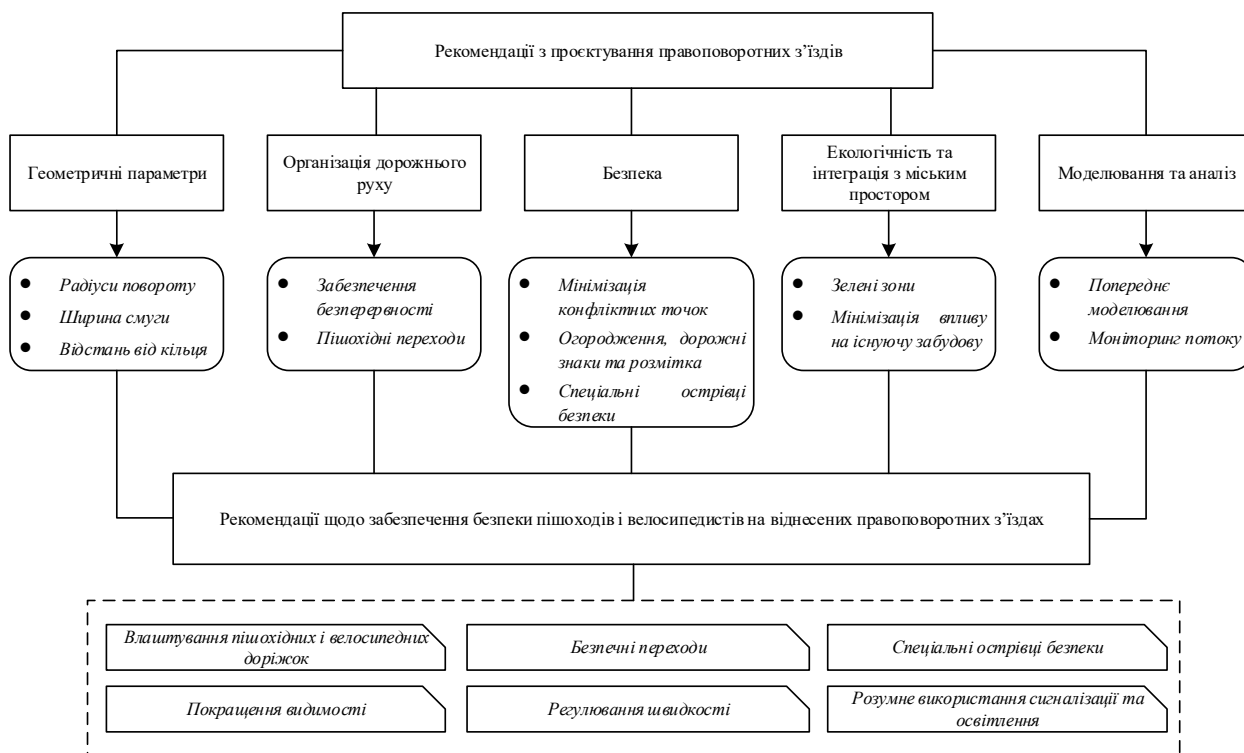


Рисунок 4 – Рекомендації з проєктування правоповоротних з'їздів на кільцевих розв'язках
Figure 4 – Recommendations for the design of right-turn exits at roundabouts.

Ось основні рекомендації з проєктування правоповоротних з'їздів на кільцевих розв'язках, сформовані на основі переваг, функціонального аналізу та міжнародного досвіду [11-14]:

1. Геометричні параметри.

Радіуси повороту. Розрахунок радіусів повороту є критично важливим для забезпечення безпечного та комфортного руху. Вони залежать від розрахункової швидкості, типу транспортних засобів та доступної площі. Основна мета – забезпечити плавні криві, що дозволяють забезпечити комфортний рух автомобілям підтримувати швидкість 50 км/год для міських зон та 80 км/год для позаміських зон.

Радіус правоповоротних з'їздів не повинен бути значно більшим за радіус найшвидшого в'їзду, передбаченого на кільцевому перехресті. Це забезпечить швидкість транспортних засобів на відокремленій смузі, подібну до швидкості на кільцевому перехресті, що призведе до безпечного злиття транспортних потоків.

Існують готові рекомендації щодо допусків радіусів правоповоротних з'їздів залежно від швидкості руху на основному кільці. Ці значення допомагають проєктувальникам забезпечити забезпечення радіусу для забезпечення безпечного і комфортного руху. Основні параметри залежать від швидкості руху і радіусів основного кільця.

Оптимальні значення мінімальних радіусів

Для міського середовища :

Швидкість: 20–40 км/год → Радіус: 15–30 м.

Для автомобільних доріг загального користування:

Швидкість: 50–80 км/год → Радіус: 50–120 м.

Для вантажного транспорту :

Радіус має бути більшим на 20–30% через більші габарити й обмеження маневреності.

Рекомендації щодо мінімізації площі: застосування еліптичних або спіральних кривих, замість класичного кола конструкції криві з поступовим зменшенням або збільшенням радіуса для плавності руху.

Ширина смуги. Розрахунок ширини смуги віднесеного з'їзду має забезпечити безпечний та комфортний рух, особливо для великогабаритного транспорту. Ця ширина залежить від типу транспортних засобів, швидкості руху та наявності (фартух наїзду).

Оптимальне значення ширини смуги з урахуванням додаткового розширення на кривих складає 6,0 м та укріплення узбіччя(відстань між крайовою лінією та бортовим каменем) 0,5 м з кожної сторони.

Відстань від кільця. З'їзд має бути достатньо віддаленим від основного кільця, щоб уникнути перетину транспортних потоків. Мінімальна відстань між кільцевим перехрестям і виїздом на з'їзд залежить від кількох факторів, таких як швидкість руху на кільці, тип дороги, об'єм руху та тип транспортних засобів. Відстань повинна бути такою, щоб водії було достатньо часу для маневру.

Зазвичай мінімальна відстань між кільцем і початком виїзду становить 50–150 м залежно від швидкості руху та інтенсивності руху. Точне значення розраховується індивідуально для кожної розв'язки.

Інтеграція правильних геометричних параметрів, а також використання островців безпеки та дорожньої розмітки, забезпечує не лише плавний і безпечний рух, а й сприяє контролю швидкості та траєкторії руху. Ці елементи відіграють ключову роль у значному підвищенні безпеки дорожнього руху та зниженні аварійності.

2. Організація дорожнього руху.

Забезпечення безперервності. З'їзди повинні проєктуватися таким чином, щоб дозволяти правоповоротному транспортному потоку рухатися без зупинок, що підвищує пропускну здатність мережі і комфорт для водіїв.

Пішохідні переходи. Врахування потреб пішоходів є обов'язковим. Для їхньої безпеки слід передбачати окремі регульовані наземні переходи або багаторівневі (підземні чи надземні) переходи на маршрутах віднесених з'їздів. Це мінімізує конфліктні точки між автомобілями та пішоходами.

3. Безпека.

Мінімізація конфліктних точок: з'їзди повинні проєктуватися таким чином, щоб уникати перетину транспортних потоків. Якщо це неминуче, необхідно чітко встановити пріоритет проїзду, використовуючи відповідні дорожні знаки або розмітку.

Огородження, дорожні знаки та розмітка: щоб забезпечити чітку та інтуїтивно зрозумілу навігацію, всі з'їзди мають бути добре позначені. Дорожня розмітка допомагає водіям слідувати правильній траєкторії, а плавність злиття потоків запобігає ризику виникнення дорожньо-транспортних пригод. Огородження (бар'єри) та дорожні знаки відіграють важливу роль у зниженні швидкості та запобіганні виїзду за межі проїжджої частини.

Спеціальні островці безпеки: островці є ключовим елементом для фізичного розділення смуг. Вони не тільки обмежують швидкість, але й покращують видимість та слугують фізичним бар'єром між транспортними потоками. Островці допомагають водіям дотримуватися безпечної траєкторії, що особливо важливо для пішоходів та велосипедистів.

4. Екологічність та інтеграція з міським простором.

Зелені зони: застосування озеленення на прилеглих територіях допомагає зменшити шум, покращити якість повітря та інтегрувати інфраструктуру в міський ландшафт.

Мінімізація впливу на існуючу забудову: в умовах щільної міської забудови, важливо мінімізувати необхідну площу для будівництва, щоб уникнути знесення будівель та зберегти міський простір.

Загалом, впровадження віднесених правоповоротних з'їздів є комплексним завданням, що вимагає врахування експлуатаційних, безпекових та екологічних аспектів. Тільки такий підхід забезпечить їхню довгострокову ефективність.

5. Моделювання та аналіз.

Щоб гарантувати ефективність та безпеку віднесених правоповоротних з'їздів, необхідно застосовувати сучасні методи транспортного моделювання та аналізу. Ці етапи є невід'ємною частиною процесу проектування.

Попереднє моделювання: перед початком будівництва важливо провести транспортне моделювання використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення (PTV Vissim або Aimsun). Ці інструменти дозволяють створити віртуальну модель транспортної розв'язки та імітувати рух, щоб оцінити ефективність з'їздів, спрогнозувати рівень заторів та пропускну здатність мережі. Таке моделювання допомагає виявити потенційні проблеми на ранніх стадіях і оптимізувати проєкт.

Моніторинг потоку. Після реалізації проєкту слід проводити регулярний моніторинг руху транспортних потоків, що дає змогу оцінити реальні експлуатаційні характеристики та внести корективи для подальшого покращення.

Ці рекомендації відповідають принципам проектування транспортної інфраструктури. Це дозволяє забезпечити безпечний, безперервний та зручний рух, зменшуючи ризик аварій та покращуючи пропускну здатність мережі. Вони можуть бути адаптовані залежно від особливостей місцевої мережі та інтенсивності руху.

Проектування правоповоротних з'їздів на кільцевих розв'язках з урахуванням пішоходів та велосипедистів є складною системою, оскільки незалежні з'їзди можуть значно ускладнити їх рух, створюючи негативні небезпеки та бар'єри для безпеки. Враховуючи це, при проектуванні таких з'їздів необхідно повністю спланувати інфраструктуру, яка забезпечує безпеку для всіх учасників дорожнього руху.

Впровадження віднесених правоповоротних з'їздів, хоч і оптимізує рух автомобілів, але створює нові виклики для вразливих учасників дорожнього руху – пішоходів і велосипедистів. Основні проблеми включають: ризик зіткнень та «Мертві зони». Транспортні засоби на з'їздах можуть рухатися без зупинок, а водії можуть не очікувати на пішоходів чи велосипедистів, які перетинають дорогу на поворотах з'їздів виникають зони обмеженої видимості, де водій може не помітити пішохода або велосипедиста.

Рекомендації щодо забезпечення безпеки пішоходів і велосипедистів на віднесених правоповоротних з'їздах [11-14]:

Влаштування пішохідних і велосипедних доріжок. Проектування окремих пішохідних та велосипедних смуг, що чітко відокремлюються від основних з'їздів, знижує ризики зіткнення. Ці доріжки мають бути підняті або відокремлені бордюром чи іншими фізичними бар'єрами, щоб забезпечити безпечний перехід через з'їзди без необхідності переходити дорогу з високою швидкістю руху.

Покращення видимості. Збільшення радіусів поворотів на з'їзді та забезпечення гарної видимості пішоходів і велосипедистів з більшої точки дозволить водіям краще реагувати на їх наявність. Це можна досягти завдяки проєкту безпечних та видимих пішохідних переходів у зонах з низькою швидкістю.

Безпечні переходи. Необхідно забезпечити захищені пішохідні переходи з чіткими розмітками та сигналізацією. Вони повинні бути встановлені на місцях з низьким потоком транспорту та з можливістю для водіїв зменшити швидкість на з'їздах. Для велосипедистів можна провести спеціальні переходи через з'їзд, які будуть фізично відокремлені від автомобільного руху. Наприклад, підйом чи спуск через спеціальні мости або тунелі для велосипедистів.

Регулювання швидкості. У місцях, де є можливість конфліктів між великими потоками (наприклад, між правоповоротними автомобілями і пішоходами/велосипедистами), необхідно зменшувати швидкість руху на з'їздах. Це можна забезпечити через знаки обмеження швидкості та фізичні бар'єри, які змушують водіїв знижувати швидкість перед переходами.

Спеціальні островці безпеки. Для пішоходів і велосипедистів можна використовувати островці безпеки, які забезпечують місце для очікування та безпечного перетинання з'їзду. Вони можуть бути оснащені додатковими знаками, світлофорами або іншими сигналами, які допомагають керувати рухом.

Розумне використання сигналізації та освітлення. Сигналізація на переходах (наприклад, пішохідні світлофори або сигнали для велосипедистів) може суттєво підвищити безпеку. Яскраве освітлення на переходах дозволяє зменшити ризики, особливо в темний час доби.

Висновок. Впровадження віднесених правоповоротних з'їздів на кільцевих розв'язках є високоефективним рішенням для управління транспортними потоками в умовах зростаючої інтенсивності руху та щільної міської забудови. Це не просто розширення мережі, а стратегічний підхід, що забезпечує значне підвищення пропускної здатності, зниження заторів та підвищення безпеки на ключових транспортних вузлах. Завдяки відокремленню правоповоротного руху транспортних потоків від основного кільцевого потоку, мінімізується кількість конфліктних точок, що сприяє безперервному та зручному руху.

Проектування таких з'їздів вимагає комплексного підходу, що враховує не лише потреби автомобілістів, але й безпеку всіх учасників руху. Необхідно ретельно розраховувати геометричні параметри (радіуси, ширину смуг), а також забезпечувати належну інтеграцію з існуючою дорожньою мережею. Особлива увага має приділятися вразливим учасникам руху – пішоходам та велосипедистам. Для їх захисту важливо застосовувати фізичні бар'єри, островці безпеки, окремі доріжки, регульовані переходи та розумне використання сигналізації.

В Україні такі рішення є перспективним напрямком для розвитку транспортної інфраструктури, що може суттєво покращити мобільність у великих містах. Подальше моделювання та аналіз дозволять адаптувати міжнародний досвід до місцевих умов, забезпечуючи максимальну ефективність та безпеку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Беленчук О.В. Підвищення безпеки руху на транспортних розв'язках в одному рівні / О.В. Беленчук, Н.І. Попович, Є.Ф.Теплюк // Дороги і мости. – 2023. – Вип. 28. С. 234-241. – Режим доступу: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.234>
2. Roundabouts and other intersections. (Кільцеві розв'язки та інші перехрестя). Інформаційний бюлетень Інституту досліджень безпеки дорожнього руху (SWOV). – Гаага, червень, 2022. – 22 с. – Режим доступу: <https://www.swov.nl/en/facts-figures/factsheet/roundabouts-and-other-intersections>
3. Roundabouts – Technical Summary. (Кільцеві перехрестя. Технічний звіт) Номер звіту: FHWA-SA-10-006. Федеральне управління автомобільних доріг. Управління безпеки. – США, 2010. – 32 с. Режим доступу: <https://rosap.nhtl.gov/view/dot/42603>
4. Тарасюк В.П. Обґрунтування доцільності влаштування саморегульованих кільцевих розв'язок на вулично-дорожній мережі міста. / В.П. Тарасюк, Д.О. Беспалов, В.П. Терещук, М.С. Король // Дороги і мости. – 2023 – Випуск 28. – С. 389-397. – Режим доступу: <https://pdfs.semanticscholar.org/9d00/725f4f6c2135de1de79ae3ece0924ee91bba.pdf>
5. Kalašová A. Comparison of traffic flow characteristics of signal controlled intersection and turbo roundabout. / A. Kalašová, S. S. Kubíková, K. Čulík, J. Palúch// The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji, – 2020. – 88(2), 19-34. – Режим доступу: <https://doi.org/10.14669/AM.VOL88.ART2>
6. У Львові перебудують перехрестя на вулицях Стрийська – Рубчака: що зміниться / Офіційний сайт Львівської міської ради. – 28 серп. 2024. – Режим доступу: <https://city-adm.lviv.ua/news/city/transport/303103-u-lvovi-perebuduyut-perekhrestya-na-vulitsyakh-strijska-rubchaka-shcho-zminitsya> [дата звернення: 24.02.2025]
7. На 8-ми перехрестях столиці облаштували кільцеві розв'язки (+фото) / Офіційний портал Києва. – 24 трав. 2023. – Режим доступу: https://kyivcity.gov.ua/news/na_8-mi_perekhrestyakh_stolitsi_oblashtovali_kiltsevi_rozvyazki_foto/ [дата звернення: 16.12.2024]
8. Colorado Department of Transportation. CDOT Roadway Design Guide. 2023. Denver: CDOT, 2023. – 1 електрон. ресурс. – Режим доступу: <https://www.codot.gov/business/designsupport>

9. Литвин В.В. Кількісна оцінка ефективності зміни схеми руху на перехресті вул. Калинова – пр. П. Калнишевського (м. Дніпро). / В.В. Литвин, Ю.І. Мельнікова, М.І. Лазуткін // Сучасні технології в машинобудуванні на транспорті, 2024, №1(22). с. 222-232
Режим доступу: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/article/view/1364/1230>
10. Right-turn bypass lanes [Електронний ресурс]. – Mypdh.engineer, 2025. – Режим доступу: <https://mypdh.engineer/lessons/right-turn-bypass-lanes/> (дата звернення: 05.06.2025).
11. Colorado Department of Transportation. Roadway Design Guide [Електронний ресурс]. – Denver: CDOT, 2023. – 604 р. – Режим доступу: https://www.codot.gov/business/designsupport/bulletins_manuals [дата звернення: 05.06.2025]
12. ДСТУ 3587-97. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану.
13. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво.
14. ДБН В.2.3-5-2018 Вулиці та дороги населених пунктів. – Київ, 2018. – 61 с.

REFERENCES

1. Belenchuk, O. V., Popovych, N. I., & Tepluk, Ye. F. (2023). Pidvyshchennia bezpeky rukhu na transportnykh rozv'iazkakh v odnomu rivni [Improving traffic safety at at-grade interchanges]. *Dorohy i mosty – Roads and Bridges*, 28. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.234> [in Ukrainian].
2. SWOV Institute for Road Safety Research. (2022, June). Roundabouts and other intersections [Kil'tsevi rozv'iazky ta inshi perekhrestia]. The Hague: SWOV. <https://www.swov.nl/en/facts-figures/factsheet/roundabouts-and-other-intersections> [in English].
3. Federal Highway Administration. (2010). Roundabouts – Technical Summar [Kil'tsevi perekhrestia. Tekhnichniy zvit] (Report No. FHWA-SA-10-006). U.S. Department of Transportation, Office of Safety. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/42603> [in English].
4. Tarasiuk, V. P., Bepalov, D. O., Tereshchuk, V. P., & Korol, M. S. (2023). Obgruntuvannia dotsilnosti vlashtuvannia samorehulovanykh kil'tsevykh rozv'iazok na vulychno-dorozhnii merezhi mista [Feasibility justification of self-regulated roundabouts in urban street-road networks]. *Dorohy i mosty – Roads and Bridges*, 28. <https://pdfs.semanticscholar.org/9d00/725f4f6c2135de1de79ae3ece0924ee91bba.pdf> [in Ukrainian].
5. Kalašová, A., Kubíková, S. S., Čulík, K., & Palúch, J. (2020). Comparison of traffic flow characteristics of signal-controlled intersection and turbo roundabout. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 88(2), 19–34. <https://doi.org/10.14669/AM.VOL88.ART2> [in English].
6. Lviv City Council. (2024, August 28). U Lvovi perebuduiut perekhrestia na vulytsiakh Stryiska – Rubchaka: shcho zminytisia [Reconstruction of the intersection at Stryiska–Rubchaka streets in Lviv: What will change]. Lviv City Council Official Website. <https://city-adm.lviv.ua/news/city/transport/303103-u-lvovi-perebuduyut-perekhrestia-na-vulytsyakh-strijska-rubchaka-shcho-zminytisia> [in Ukrainian].
7. Kyiv City Official Portal. (2023, May 24). Na 8-my perekhrestiakh stolytsi oblashtuvaly kil'tsevi rozv'iazky (+foto) [Eight roundabouts arranged at intersections in Kyiv (+photos)]. Kyiv City Official Website. https://kyivcity.gov.ua/news/na_8-mi_perekhrestyakh_stolitsi_oblashtuvali_kiltsevi_rozvyazki_foto/ [in Ukrainian].
8. Colorado Department of Transportation. (2023). CDOT Roadway Design Guide. Denver: CDOT. <https://www.codot.gov/business/designsupport> [in English].
9. Lytvyn, V. V., Melnikova, Yu. I., & Lazutkin, M. I. (2024). Kil'kisna otsinka efektyvnosti zminy skhemy rukhu na perekhresti vul. Kalynova – pr. P. Kalnyshevskoho (m. Dnipro) [Quantitative assessment of traffic scheme change efficiency at Kalynova–Kalnyshevskyyi intersection in Dnipro]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni na transporti – Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 1(22), 222–232. <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/article/view/1364/1230> [in Ukrainian].
10. Right-turn bypass lanes. (2025). Mypdh.engineer. <https://mypdh.engineer/lessons/right-turn-bypass-lanes/> [in English].
11. Colorado Department of Transportation. (2023). Roadway Design Guide. Denver: CDOT. https://www.codot.gov/business/designsupport/bulletins_manuals [in English].
12. DSTU 3587-97. (1997). Bezpeka dorozhnogo rukhu. Avtomobil'ni dorohy, vulytsi ta zaliznychni pereizdy. Vymohy do ekspluatatsiinoho stanu [Road safety. Highways, streets, and railway crossings. Operational condition requirements]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].

13. DBN V.2.3-4:2015. (2015). *Avtomobil'ni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo* [Highways. Part I. Design. Part II. Construction]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
14. DBN V.2.3-5:2018. (2018). *Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv* [Streets and roads of settlements]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].

РЕФЕРАТ

Петрович В.В. Методи удосконалення організації дорожнього руху на кільцевих розв'язках. / В.В. Петрович, І.А. Виговська, Д.А. Ткаченко // Вісник Національного транспортного університету // Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

В статті розглянуто сучасні підходи до управління транспортними потоками на прикладі застосування віднесених правоповоротних з'їздів у складі кільцевих розв'язок. Такі елементи дорожньої інфраструктури дають змогу суттєво підвищити пропускну здатність, знизити рівень заторів та кількість конфліктних точок, що позитивно впливає на безпеку руху.

Об'єкт: віднесені правоповоротні зїзди на кільцевих розв'язках у міських та позаміських умовах.

Метою роботи є аналіз функціональних можливостей віднесених правоповоротних з'їздів, оцінка їх переваг і недоліків, а також формування рекомендацій щодо їх впровадження з урахуванням безпеки всіх учасників руху.

Методи дослідження аналіз наукових джерел, вивчення міжнародного досвіду проектування, транспортне моделювання з використанням програмних комплексів PTV Vissim та Aimsun, а також оцінку експлуатаційних показників побудованих розв'язок у Львові та Києві.

У результаті встановлено, що застосування віднесених правоповоротних з'їздів дозволяє знизити навантаження на кільцеву розв'язку, підвищити пропускну здатність транспортної мережі та забезпечити безперервність руху. Новизна полягає в адаптації міжнародних підходів до українських умов із врахуванням обмеженої міської площі та підвищених вимог до безпеки пішоходів і велосипедистів.

Основні техніко-експлуатаційні характеристики включають розрахункові радіуси поворотів (15–120 м залежно від швидкості руху), ширину смуг (6 м з укріпленням узбіччям), застосування перехідно-швидкісних смуг або регульованих виїздів, а також використання острівців безпеки та розмітки.

Ступінь впровадження в Україні обмежується поодинокими проєктами у Львові та Києві, однак у світовій практиці ця технологія широко використовується.

Прогнозується, що подальший розвиток цієї технології в Україні буде пов'язаний із поширенням транспортного моделювання, інтеграцією інтелектуальних систем управління рухом та створенням інфраструктури, орієнтованої на безпеку вразливих учасників дорожнього руху.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАНСПОРТНІ ПОТОКИ, ОРГАНІЗАЦІЯ ДОРОЖНЬОГО РУХУ, КІЛЬЦЕВІ РОЗВ'ЯЗКИ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, БЕЗПЕКА ДОРОЖНЬОГО РУХУ, ТРАНСПОРТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ПРАВОПОВОРОТНІ З'ЇЗДИ.

ABSTRACT

Petrovich V.V., Vyhovska I.A., Tkachenko D.A. Methods for improving traffic management at roundabouts. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. –Issue 1 (60).

The article discusses modern approaches to traffic flow management using the example of the use of right-turn lanes at roundabouts. These elements of road infrastructure make it possible to significantly increase traffic capacity, reduce congestion and the number of conflict points, which has a positive effect on traffic safety.

Object: right-turn lanes at roundabouts in urban and suburban areas.

The purpose of this work is to analyze the functional capabilities of designated right-turn lanes, evaluate their advantages and disadvantages, and develop recommendations for their implementation, taking into account the safety of all road users.

Research methods included analysis of scientific sources, study of international design experience, transport modeling using PTV Vissim and Aimsun software packages, and assessment of the operational performance of constructed solutions in Lviv and Kyiv.

As a result, it was established that the use of separated right-turn lanes reduces the load on roundabouts, increases the throughput capacity of the transport network, and ensures traffic continuity. The

novelty lies in the adaptation of international approaches to Ukrainian conditions, taking into account limited urban space and increased safety requirements for pedestrians and cyclists.

The degree of implementation in Ukraine is limited to isolated projects in Lviv and Kyiv, but this technology is widely used in global practice.

It is predicted that further development of this technology in Ukraine will be linked to the spread of transport modeling, the integration of intelligent traffic management systems, and the creation of infrastructure focused on the safety of vulnerable road users. Key technical and operational characteristics include design turning radii (15–120 m depending on speed), lane width (6 m with reinforced shoulders), the use of transition lanes or controlled exits, and the use of safety islands and markings.

KEYWORDS: TRANSPORT FLOWS, TRAFFIC MANAGEMENT, ROUNDABOUTS, CAPACITY, TRAFFIC SAFETY, TRANSPORT MODELING, RIGHT-TURN EXITS.

АВТОРИ:

Петрович Володимир Васильович, кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, Національний транспортний університет, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, e-mail: petrovichvv60@ukr.net, тел. + 380442807338, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1, к.138, orcid.org/0000-0003-0422-2535.

Виговська Інна Анатоліївна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху, e-mail: i.vyhovska2609@gmail.com, тел. +380442804885, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1, к.435, orcid.org/0000-0003-1426-9863.

Ткаченко Дмитро Анатолійович, Національний транспортний університет, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, e-mail: avtomag111@gmail.com, тел. +380503886608, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1, к.138, orcid.org/0009-0001-0788-5927.

AUTHOR:

Petrovych Volodymyr, Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 138, orcid.org/0000-0003-0422-2535.

Vyhovska Inna, PhD in Engineering, National Transport University, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Road Safety, e-mail: i.vyhovska2609@gmail.com, tel. +380442804885, Ukraine, 01010, Kyiv, 1 M. Omelyanovych-Pavlenko Str., room 435. orcid.org/0000-0003-1426-9863.

Tkachenko Dmytro, National Transport University, PhD student of the department of Transportation Construction and Property Management. e-mail: avtomag111@gmail.com, tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 138, orcid.org/0009-0001-0788-5927.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Понкратов Денис Павлович, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний університет міського господарства, Харків, Україна.

Бубела Андрій Володимирович, доктор технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Denys Pavlovych, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Kharkiv National University of Urban Economy, Kharkiv, Ukraine.

Bubela Andrii, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National Transport University, Professor of the Road Construction and Property Management Department, Kyiv, Ukraine.

ТИПИ ТА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ АРХІТЕКТУР ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Ходаков Д.В., кандидат технічних наук, Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна, hodakovdv@gmail.com, orcid.org/0009-0000-7970-151X

TYPES AND FEASIBILITY OF SOFTWARE ARCHITECTURE USAGE

Hodakov D.V., candidate in technical sciences, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, hodakovdv@gmail.com, orcid.org/0009-0000-7970-151X

Вступ. Моделювання має багату історію застосування в усіх галузях інженерії та наукових дослідженнях. Неможливо налагодити випуск нових літаків чи автомобілів, не випробувавши свій проект на моделях: від комп'ютерних моделей і креслень до фізичних моделей в аеродинамічній трубці та повномасштабних прототипів. Якісна модель завжди включає елементи, які суттєво впливають на результат і не включає ті, які малозначні на даному рівні абстракції [2]. Кожна система може бути описана з різних точок зору, для чого використовуються різні моделі, кожна з яких є семантично замкненою абстракцією системи. Модель може бути структурною, що підкреслює організацію системи, або моделлю поведінки, що відображає її динаміку.

Для швидкого й ефективного розроблення програмного забезпечення (ПЗ) потрібно залучати високопрофесійну команду розробників, вибрати правильні методи та інструменти роботи. Необхідно, щоб процес розроблення був ретельно продуманий і адаптований до мінливих потреб користувачів, технології розроблення та життєвого циклу (ЖЦ) системи [1]. Основою створення якісного ПЗ є моделювання, що дозволяє:

- наочно продемонструвати бажану структуру і поведінку системи;
- здійснювати візуалізації та керування її архітектурою;
- забезпечити краще розуміння створюваної системи, що найчастіше призводить до її спрощення й забезпечує можливість повторного використання;
- мінімізувати ризики.

Постановка проблеми. Одним з найпродуктивніших напрямків у проектуванні ПЗ стало використання візуальних схем, змальованих на папері й екрані комп'ютера, що відображають ті чи інші вигляди ПЗ.

Аналітична модель – це стисла й точна абстракція того, що саме повинна робити система. Аналітична модель не повинна містити ніяких рішень щодо реалізації. Наприклад, клас Window в аналітичній моделі системи керування вікнами для робочої станції повинен бути описаний у термінах видимих атрибутів і операцій. Аналітична модель складається з двох частин:

- 1) моделі предметної області (domain model) – опису об'єктів реального світу, що відображає система,
- 2) моделі програмного додатка (application model) – опису видимих користувачеві частин самого додатка.

Наприклад, для додатка біржового маклера об'єктами предметної області можуть бути акції, облігації, торги й комісія. Модель предметної області, у свою чергу, складається з моделі класів та моделі взаємодії. Об'єкти моделі додатка можуть керувати здійсненням торгів і відображати результати. Гарна модель повинна бути доступною для розуміння та критики з боку експертів, які не є програмістами.

В залежності від складності домену, що в першу чергу задається початковим рівнем його розуміння, процес може трохи відрізнятись, але в середньому можна прийняти наступний порядок дій.

- Занотувати своє розуміння того, яку проблему має вирішувати ПЗ.
- Перерахувати основних користувачів або персон.
- Продумати ключові сценарії використання або скористатися сценаріями замовника.
- Визначити процеси, які необхідні для забезпечення діяльності компанії замовника.

Це, по суті, і буде контекст, який вже можна використовувати для нарощування обсягу інформації: пошуку у Google чи запитів до ChatGPT, чи, в ідеалі, питань до замовника та SME (експерта предметної області).

Цей процес займає від декількох годин до днів і напряду залежить від якості та кількості вхідної інформації.

Аналіз останніх досліджень. Вибір архітектури залежить від багатьох факторів: масштабу проекту, кількості користувачів, необхідності масштабування та розширення, і навіть технологічних можливостей команди [2, 3]. Кожен тип архітектури має свої плюси і мінуси, і найкраща архітектура – це та, що відповідає конкретним вимогам вашої системи.

Архітектурні шаблони – це готові рішення для повторюваних проблем, які зустрічаються при розробці програмного забезпечення і шаблони допомагають організовувати структуру і взаємодію компонентів в кожному типі архітектури, забезпечуючи гнучкість, масштабованість та ефективне управління ресурсами. Кожен тип архітектури має свої специфічні шаблони, які використовуються для організації взаємодії між компонентами системи [3].

Мова UML створювалася як мова моделювання загального призначення для застосування в таких «дискретних» галузях, як програмне забезпечення, апаратні засоби й цифрова логіка [1]. Структури UML дозволяють фіксувати різноманітні рішення з відображення:

- 1) функціональності системи;
- 2) динамічної та статичної структури системи;
- 3) організації елементів системи;
- 4) реалізації системи.

Популярності набуває використання UML при проектуванні баз даних. Завдяки відкритості (наявності в мові механізмів розширення) він надає потужний інструментарій для вирішення завдань інших галузей, наприклад, бізнесу-моделювання [1].

Мова UML призначена для вирішення таких завдань.

1. Надати в розпорядження користувачів готову до використання виразну потужну мову візуального моделювання, що дозволяє розробляти осмислені моделі й обмінюватися ними.
2. Передбачити внутрішні механізми розширення й спеціалізації базових концепцій мови.
3. Забезпечити максимальну незалежність проекту створення програмного забезпечення від конкретних мов програмування й процесів розробки.
4. Забезпечити формальну основу для однозначної інтерпретації мови.
5. Стимулювати розширення ринку об'єктно-орієнтованих інструментальних засобів створення програмного забезпечення.
6. Інтегрувати кращий практичний досвід використання мови й реалізації програмних засобів його підтримки.

Основна частина. З розвитком ІТ сфери і продуктів, формувались і підходи до побудови архітектури ПЗ.

Розглянемо основні типи архітектури ПЗ, які на сьогодні активно використовуються.

Монолітна архітектура означає, що вся програма складається з єдиного блоку коду, де всі частини взаємодіють прямо одна з одною (рис. 1). Якщо це велика програма, у ній є всі можливості та функції в одному місці.

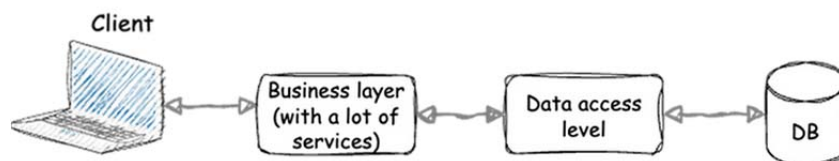


Рисунок 1 – Монолітна архітектура
Figure 1 – Monolithic Architecture

Мікросервісна архітектура поділяє систему на багато дрібних автономних частин (мікросервісів), де кожен виконує окрему функцію (рис. 2). Це фактично міні-програми. Ці частини взаємодіють між собою через спеціальні протоколи (наприклад, через API).

Подійно-орієнтована архітектура (Event-driven architecture). Ця архітектура побудована навколо подій – маленьких повідомлень, що відправляються, коли щось відбувається в системі (рис. 3). Різні компоненти (сервіси) реагують на ці події.

Сервіс-орієнтована архітектура (SOA). SOA – архітектура, де всі частини системи представлені у вигляді незалежних сервісів, які можуть обмінюватися даними один з одним (рис. 4). Подібна до мікросервісної архітектури, але орієнтоване на більші сервіси.

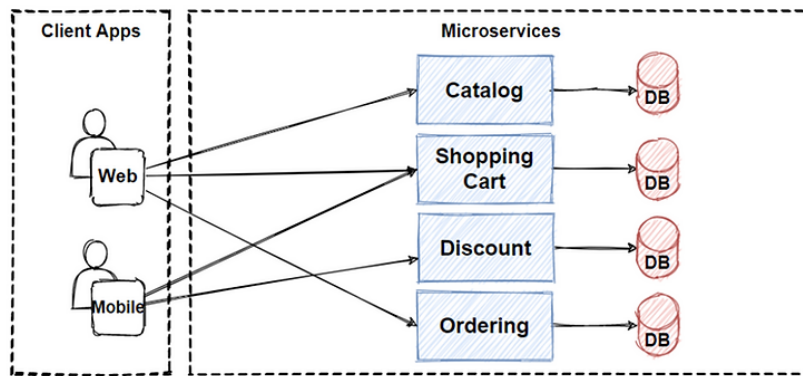


Рисунок 2 – Мікросервісна архітектура
Figure 2 – Microservice Architecture

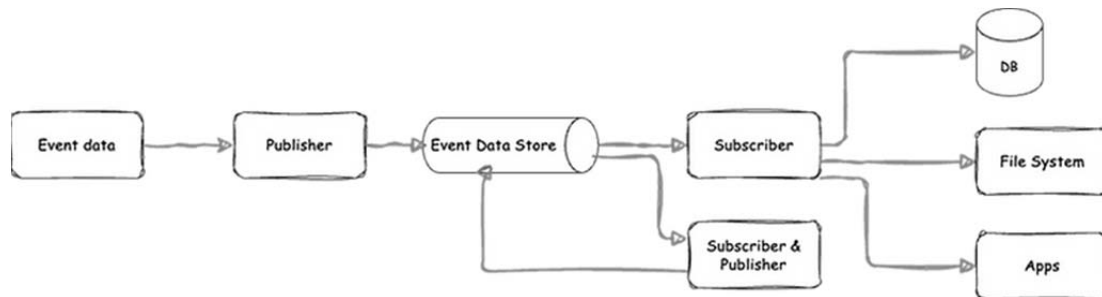


Рисунок 3 – Подійно-орієнтована архітектура
Figure 3 – Event-Driven Architecture

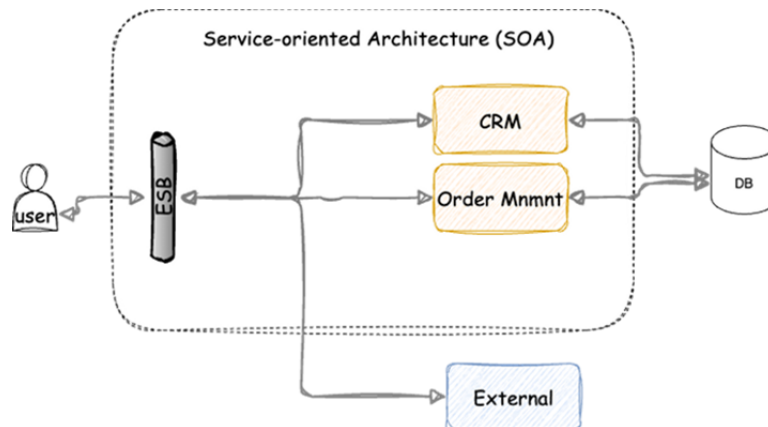


Рисунок 4 – Сервіс-орієнтована архітектура
Figure 4 – Service-Oriented Architecture

Для прикладу візьмемо задачу з реального проєкту, але значно спрощену: «Побудувати систему для морського вантажного терміналу, що буде відповідати за розвантаження контейнерів із судна та розміщення їх у контейнерному депо».

Не залежно від нотації, наступним кроком моделювання буде запис всіх можливих сутностей (об'єктів) у домені (рис.5). Для концептуальної моделі здебільшого це будуть фізичні об'єкти, які потім будуть використовуватися (або ні) у майбутній інформаційній системі.

Ідентифікувати основні об'єкти можна, розглядаючи процеси та сценарії використання, це щось, над чим виконується операція (фізичні об'єкти, документи й т.д.), і сутність яка виконує ці операції.



Рисунок 5 – Сутності об'єктів
Figure 5 – Entity Objects

Далі потрібно записати атрибути – характеристики обраних сутностей. Відрізнити атрибут від сутності (об'єкту) дуже просто: атрибути самі ніякої роботи не виконують, вони тільки можуть щось описати. Також в атрибутів є значення, наприклад (рис.6).



Рисунок 6 – Об'єкт – атрибут – значення
Figure 6 – Object – Attribute – Value

Тепер можна переходити до зв'язків. Зв'язок – це те, яким чином сутності асоціюються одна з одною. Зв'язок можна формулювати: дією, що поєднує дві сутності, або співвідношенням сутностей одна до одної.

Зв'язок в основному встановлюють, керуючись загальною логікою, та іноді його можуть продиктувати атрибути (рис. 7).

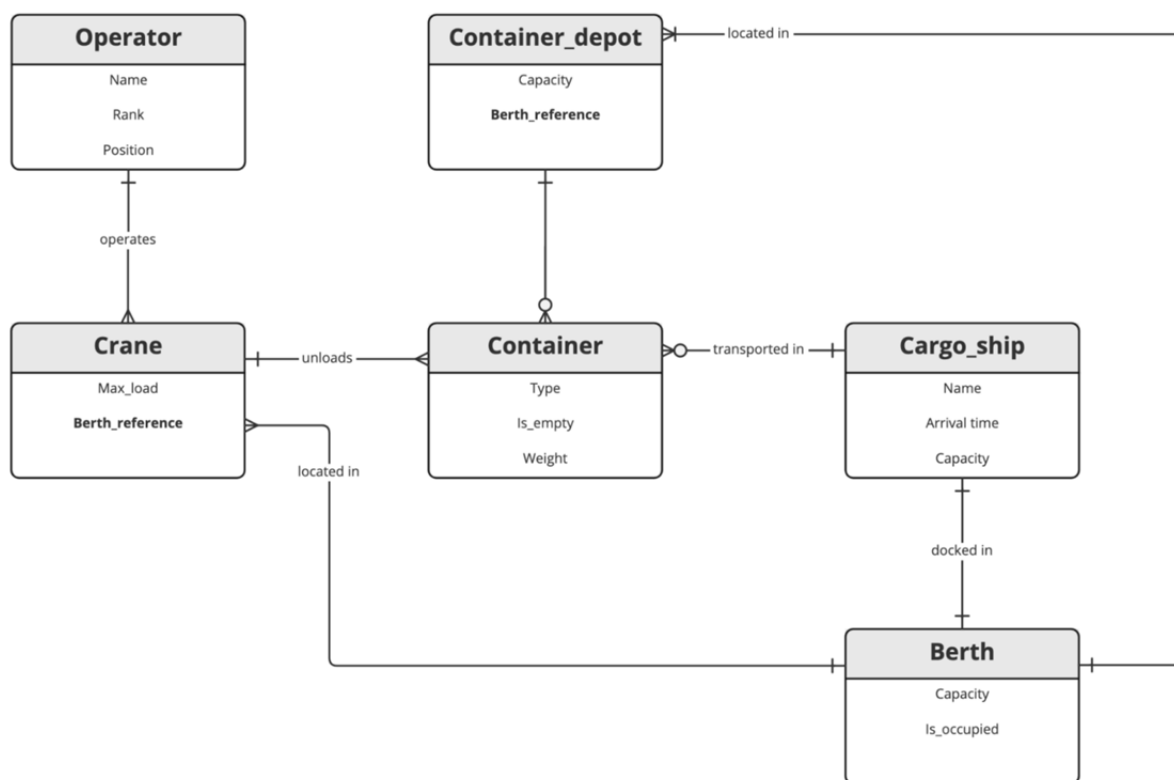


Рисунок 7 – Зв'язки між атрибутами
Figure 7 – Attribute Relationships

У наведеному прикладі:

- один оператор маніпулює декількома кранами,
- декілька кранів розташовані на одному причалі,
- щонайменше одна зона розміщення контейнерів розташована на одному причалі,
- один кран може розвантажити декілька контейнерів,
- багато або жодного контейнера може бути перевезено на кораблі,
- один корабель може бути пришвартовано в одному доці.

Жирним виділено приклад атрибута, який є посиланням на іншу сутність. Кардинальність не відіграє великої ролі при моделюванні концепту. Щоб засвоїти предметну область на рівні, достатньому для проведення пресеїлу, це не завжди потрібно, скоріше бажано.

Немає, загально прийнятих конкретних метрик, щоб визначити, коли пора завершувати процес. Поки що, не придумано кращого ніж «має бути достатньо». В залежності від масштабу (галузь знань в цілому, бізнес замовника, конкретний продукт) кількість сутностей і деталізація будуть різними.

Відмінності між типами архітектури програмного забезпечення.

Моноліт – це один великий блок коду, в той час як мікросервіси складаються з дрібних автономних частин. Мікросервіси дозволяють легше розділяти та масштабувати програму, тоді як моноліт простіший на початкових етапах.

Клієнт-сервер має чітке розділення між тим, що бачить користувач (клієнт), і тим, що працює на задньому плані (backend, сервер). Мікросервісна і SOA архітектури більше орієнтовані на поділ сервісів, але SOA орієнтується на великі системи, тоді як мікросервіси – на менші й незалежні.

Архітектура обробки подій фокусується на реакції на події, а не на постійному обміні даними між частинами системи, як це відбувається в інших архітектурах.

Висновок

Таким чином, у більшості випадків ідеї, на яких ґрунтуються нові системи, є продовженням уже існуючих ідей. Існує кілька способів пошуку концепцій нових систем:

- нова функціональність – можна додати функціональність в існуючу систему;
- модернізація – зняття обмежень або універсалізація роботи системи;
- спрощення – надання звичайним людям можливості займатися тим, чим раніше займалися тільки фахівці;
- автоматизація ручних процесів;
- інтеграція – об'єднання функціональності різних систем;
- аналогії – пошук аналогій в інших предметних областях і дослідження їх на наявність корисних ідей;
- глобалізація – вивчення культури й ділової практики інших країн та впровадження їх досвіду.

Вибір архітектури залежить від багатьох факторів: масштабу проєкту, кількості користувачів, необхідності масштабування та розширення, і навіть технологічних можливостей команди.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Петрик М.Р., Моделювання програмного забезпечення: науково-методичний посібник / М.Р. Петрик, О.Ю. Петрик – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. – 200 с.
2. Табунщик Г.В. Проектування та моделювання програмного забезпечення сучасних інформаційних систем: навчальний посібник/ Г.В. Табунщик, Т.І. Каплієнко, О.А. Петрова – Запоріжжя: Дике Поле, 2016. – 250 с.
3. Martin Fowler. UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language / M. Fowler – Longman (Pearson Education) – 2003. – 300 P.

REFERENCES

1. Petryk M.R. Modeliuvannia programnogo zabezpechennia: naukovo-metoduchnyi posibnyk/ M.R. Petryk, O.Iu. Petryk – Ternopil: Vud-vo TNTU imeni Ivana Puliuia, 2015. – 200 s.
2. Tabunshchik G.V., Proektuvannia ta modeliuvannia programnogo zabezpechennia suchasnuh informaciih sustem: navchalnyi posibnyk/ G.V. Tabunshchik, T.I. Kaplienko, O.A. Petrova, – Zaporizhzhia: Dyke Pole, 2016. – 250 s.
3. Martin Fowler. UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language / M. Fowler – Longman (Pearson Education) – 2003. – 300 P.

РЕФЕРАТ

Ходаков Д.В. Типи та доцільність використання архітектур програмного забезпечення / Д.В. Ходаков // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Кожна система може бути описана з різних точок зору, для чого використовуються різні моделі, кожна з яких є семантично замкненою абстракцією системи. Модель може бути структурною, що підкреслює організацію системи, або моделлю поведінки, що відображає її динаміку. Основою створення якісного програмного забезпечення є моделювання.

Немає, загально прийнятих конкретних метрик, щоб визначити, коли пора завершувати процес. Поки що, не придумано кращого ніж «має бути достатньо». В залежності від галузі знань в цілому, кількість сутностей і деталізація будуть різними. Архітектура обробки подій фокусується на реакції на події, а не на постійному обміні даними між частинами системи.

Аналітична модель не повинна містити ніяких рішень щодо реалізації. Вибір архітектури залежить від багатьох факторів: масштабу проєкту, кількості користувачів, необхідності масштабування та розширення, і навіть технологічних можливостей команди. Кожен тип архітектури

має свої плюси і мінуси, і найкраща архітектура – це та, що відповідає конкретним вимогам вашої системи.

Запропоновано процес моделювання програмного забезпечення за допомогою візуальних схем. Робота над системою починається з розроблення концепції, для цього використовуємо готові архітектурні шаблони. Представлені найбільш пристосовані архітектурні шаблони програмного забезпечення.

Результати статті можуть бути використані під час розробки і впровадження програмного забезпечення. Також результати роботи можуть бути впроваджені в освітній процес під час викладання навчальних дисциплін циклу професійної підготовки фахівців з інженерії програмування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АРХІТЕКТУРНІ ШАБЛОНИ, МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ.

ABSTRACT

Khodakov D.V., Types and feasibility of software architecture usage. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

Every system can be described from various perspectives using different models, each being a semantically closed abstraction. A model may emphasize the structure of the system (structural model) or focus on its dynamics (behavioral model). Consequently, modeling forms the foundation for developing high-quality software.

An analytical model must not include implementation details. The choice of architecture depends on multiple factors: the project scale, number of users, scalability and extensibility needs, and even the technological capabilities of the team. Each architectural type has its pros and cons; therefore, the best architecture is the one that meets the specific needs of your system.

There are no generally accepted specific metrics to determine when it is time to end a process. So far, nothing better than “should be enough” has been invented. Depending on the field of knowledge as a whole, the number of entities and the level of detail will vary. Event processing architecture focuses on responding to events, rather than on the constant exchange of data between parts of the system.

This paper proposes a software modeling process using visual schemes. The development process starts with the concept, often built using pre-defined architectural templates. As a result, the most adaptable architectural software patterns are presented.

The results of the article can be used during software development and implementation. Also, the results of the work can be introduced into the educational process during the teaching of educational disciplines of the cycle of professional training of software engineering.

KEY WORDS: ARCHITECTURAL TEMPLATES, MODELING, DESIGNING.

АВТОР:

Ходаков Д.В., кандидат технічних наук, Державний університет «Київський авіаційний інститут», доцент кафедри інженерії програмного забезпечення, e-mail: hodakovdv@gmail.com, тел. +380444067098, Україна, 03058, м. Київ, пр. Любомира Гузара, 1, к.6-303, orcid.org/0009-0000-7970-151X.

AUTHOR:

Hodakov Daniil V., candidate in technical sciences, National Aviation University, associate professor of department of Software Engineering, e-mail: hodakovdv@gmail.com, tel. +380444067098, Ukraine, 03058, Kyiv, Lubomyr Huzar Avenue 1, of. 6-303, orcid.org/0009-0000-7970-151X.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гізун А.І., кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Київський авіаційний інститут», професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Київ, Україна.

Волкогон В.О., кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Київський авіаційний інститут», доцент кафедри інженерії програмного забезпечення, Київ, Україна.

REVIEWER:

Gizun A.I., candidate of technical sciences, associate professor (PhD), State University «Kyiv Aviation Institute», professor of Department of Software Engineering, Kyiv, Ukraine

Volkogon V.O., candidate of technical sciences, associate professor (PhD), State University «Kyiv Aviation Institute», associate professor of Department of Software Engineering, Kyiv, Ukraine

ЕНЕРГЕТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОБУСІВ ЧЕРЕЗ ПРАВИЛЬНИЙ ВИБІР МІСЦЬ ДЛЯ СТАНЦІЙ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Шенуров К.О., Національний транспортний університет, Київ, Україна,
crashday654@gmail.com, orcid.org/0009-0001-3471-4146

ENERGY OPTIMIZATION OF ELECTRIC BUS CHARGING THROUGH THE PROPER SELECTION OF STATION LOCATIONS IN THE URBAN ENVIRONMENT

Shepurov K.O., National Transport University, Kyiv, Ukraine, crashday654@gmail.com,
orcid.org/0009-0001-3471-4146

Вступ. Електрифікація автомобільного транспорту є одним із головних трендів розвитку автомобільної галузі. Майже всі великі автомобільні корпорації (BMW, Opel, Mercedes, Tesla, Nissan) активно інвестують у створення електромобілів і зарядної інфраструктури. Якщо у 2015 році частка електромобілів у світовому автопарку становила лише 0,1 %, то за прогнозами вона може зрости до 10 % у 2030 році та до 50 % у 2040 році [1]. Зі зростанням кількості електротранспорту зростає й потреба у розвитку зарядних станцій. У наукових працях підкреслюється важливість їх високого коефіцієнта корисної дії, мінімізації втрат потужності та відповідності стандартам електромагнітної сумісності [2]. Проте навіть за умови технічної досконалості окремих станцій, ключовим викликом у міському середовищі залишається правильне розташування зарядної інфраструктури. Саме від нього залежить безперебійний рух електробусів, енергетична оптимізація міських мереж та економічна ефективність проєктів [3]. Оптимізація місць для встановлення зарядних станцій передбачає врахування щільності населення, маршрутів пасажирського транспорту, можливостей локальної електричної інфраструктури та перспектив розвитку міста [4]. У сучасних дослідженнях застосовують різні інструменти: від геоінформаційних систем (ГІС) для просторового аналізу [5] до стохастичних та машинно-навчальних моделей, що дозволяють прогнозувати навантаження та адаптувати графіки зарядки в умовах невизначеності [6]. Також все більшого значення набуває інтеграція з відновлюваними джерелами енергії та системами накопичення, що підвищує стійкість міських транспортних систем [7].

Метою роботи є аналіз сучасних підходів до вибору місць для розташування зарядної інфраструктури електробусів у міському середовищі та визначення критеріїв, що забезпечують її енергетичну оптимізацію й економічну доцільність.

Результати дослідження. Сучасні підходи до планування зарядної інфраструктури зосереджені на забезпеченні її ефективності, доступності та інтеграції з міськими енергетичними системами. У наукових працях виділяють кілька ключових напрямів, що формують комплексне бачення розвитку цієї сфери.

Одним із способів планування є використання системної динаміки. Такий підхід дозволяє враховувати взаємозв'язки між попитом на зарядку, розвитком електромережі, розподілом енергетичних ресурсів та поведінкою користувачів. Моделі системної динаміки застосовуються для прогнозування майбутніх потреб у зарядній інфраструктурі, оцінки впливу збільшення кількості електробусів та визначення оптимального розміщення станцій. Важливо, що вони дозволяють виявити потенційні «вузькі місця» енергосистеми й мінімізувати пікові навантаження [8], [9].

Іншим напрямом розвитку є інтеграція зарядних станцій із відновлюваними джерелами енергії. Використання сонячних та вітрових установок у поєднанні з накопичувачами енергії дозволяє зменшити залежність від центральної мережі, підвищити гнучкість системи та сприяти скороченню викидів CO₂. У ряді міст вже впроваджуються рішення, коли зарядні пункти забезпечуються енергією локальних мікромереж, що робить роботу транспорту більш екологічною й енергонезалежною [8].

Перспективним є й використання технологій інтелектуального заряджання (smart charging). Завдяки динамічному управлінню зарядним процесом можна балансувати попит і пропозицію енергії в режимі реального часу. Це дозволяє мінімізувати витрати перевізників шляхом використання

нічних тарифів та уникати перевантаження електромережі у пікові години. Більш того, інтелектуальне заряджання зменшує потребу у дорогому розширенні енергетичної інфраструктури та підвищує термін служби акумуляторів [10].

Важливим напрямом досліджень є також оптимізація розташування зарядних станцій. Аналіз транспортних потоків і пасажиропотоків допомагає визначити стратегічно найвигідніші локації для їхнього встановлення. Наприклад, у ЄС діє регуляція AFIR, яка передбачає розміщення швидкісних зарядок кожні 60 км на ключових транспортних коридорах. У Китаї, навпаки, зроблено акцент на створення густої мережі, яка охоплює як мегаполіси, так і менш урбанізовані території [11]. Такі приклади демонструють, що правильний вибір місць є основою ефективності всієї системи.

Суттєве значення має і підтримка на регуляторному рівні. Уряди багатьох країн спрощують дозвільні процедури, запроваджують фінансові стимули для операторів та стандарти інтероперабельності зарядних систем, що забезпечує їхню зручність для користувачів і сприяє швидкому розгортанню інфраструктури [11], [8].

Не менш важливим є питання моніторингу та технічного обслуговування зарядних станцій. Дослідження доводять, що надійність роботи інфраструктури залежить від здатності операторів підтримувати високий рівень працездатності (uptime). У деяких містах уже введено нормативи, які зобов'язують забезпечувати стабільність роботи зарядних пунктів, що напряму впливає на якість транспортних послуг [12].

Поряд із інфраструктурними рішеннями все більше уваги приділяється енергетичним моделям для оптимізації зарядки електробусів. Сучасні моделі враховують обмеження мережі, змінність попиту та можливості локального виробництва енергії. Машинне навчання дедалі активніше застосовується для прогнозування навантаження: використання глибоких нейронних мереж дозволяє враховувати погодні умови, стан батареї і дорожню ситуацію, підвищуючи точність прогнозів і забезпечуючи баланс між навантаженням і комфортом пасажирів [13].

Окрему увагу приділяють інтеграції зарядної інфраструктури з відновлюваними джерелами у складі мікромереж. Такий підхід дозволяє гнучко розподіляти енергію між джерелами та накопичувачами, зменшуючи залежність від централізованих мереж і підвищуючи екологічність транспорту [14].

Важливою тенденцією є розвиток стохастичних і гібридних моделей, що враховують невизначеність у поведінці користувачів і транспортних потоках. Такі моделі дозволяють створювати адаптивні стратегії зарядки, які враховують випадкові зміни часу прибуття автобусів чи стану їхньої батареї [15].

Нарешті, моделі, орієнтовані на тарифну політику, дають можливість оптимізувати зарядку відповідно до змінних тарифів на електроенергію. Це забезпечує зменшення експлуатаційних витрат і допомагає уникати перевантаження системи у години пікових навантажень [16].

Отже, аналіз сучасних підходів показує, що розвиток зарядної інфраструктури електробусів потребує комплексного врахування технічних, енергетичних і соціально-економічних чинників. Водночас саме оптимізація розташування станцій є ключовим напрямом, адже вона безпосередньо визначає ефективність роботи всієї системи: від стабільності графіків перевезень до навантаження на електромережу та економічної доцільності проєктів. На відміну від технологій інтелектуального заряджання чи інтеграції відновлюваних джерел, які переважно впливають на енергетичну складову, просторово-логістичний аспект формує базу для функціонування транспортної інфраструктури в цілому.

Розгляд методів оптимізації розташування зарядних станцій є доцільним, оскільки саме вони дозволяють поєднати транспортну логістику, енергетичні можливості та потреби населення в єдину систему. Це робить їх найбільш релевантним інструментом для вирішення завдання енергетичної оптимізації міського електробусного транспорту.

Оптимізація розміщення зарядних станцій. Ефективне розміщення зарядних станцій для електробусів у міському середовищі визначається низкою факторів. По-перше, щільність населення та пасажиропотоку безпосередньо впливають на потребу в зарядній інфраструктурі: у районах з високим попитом на громадський транспорт кількість електробусів зростає, що потребує більшої кількості зарядних станцій [17]. По-друге, важливим є технічний стан електричної інфраструктури: станції мають розташовуватись там, де є можливість підключення до мереж із достатньою пропускну здатністю та резервною ємністю трансформаторних підстанцій [18]. Транспортна

логістика є ще одним критерієм: доцільно планувати розташування станцій у місцях кінцевих зупинок або депо, що дозволяє заряджати електробуси під час перерви без шкоди для графіка руху. За даними Li et al. (2015), «інтеграція зарядних точок у ключові вузли транспортної мережі мінімізує простої та покращує ефективність використання парку електробусів» [19]. Важливо також враховувати плани міського розвитку та зонування, щоб уникнути конфліктів із житловими чи рекреаційними зонами [20].

Геоінформаційні системи (ГІС) є одним з найефективніших інструментів для оптимізації розташування зарядних станцій. Вони дозволяють інтегрувати просторові дані — щільність населення, пасажиропотоки, доступність електромереж — і моделювати різні сценарії розвитку інфраструктури. Як зазначають Ghasri et al. (2023), «ГІС-аналіз забезпечує комплексне уявлення про взаємозв'язки між транспортними потоками та енергетичними ресурсами, що підвищує точність вибору місць для станцій» [21]. За допомогою ГІС можливо оцінювати вплив розміщення станцій на навантаження мережі, а також візуалізувати результати для ухвалення рішень інвесторами та муніципалітетами [22]. Це робить ГІС не лише інструментом аналізу, а й ефективним засобом комунікації між різними зацікавленими сторонами.

ГІС вже активно використовується у Китаї для побудови національної мережі зарядок, що поєднує міські й сільські регіони. У США ГІС застосовують для оцінки впливу зарядних станцій на локальні електромережі (наприклад, у Нью-Йорку). В ЄС використовується інтеграція ГІС з планами міського зонування, що дозволяє уникати конфліктів у забудові [25].

Для визначення оптимальної кількості та розташування станцій широко використовуються математичні моделі. Найчастіше застосовуються: лінійне та цілочисельне програмування — для пошуку рішень у рамках заданих бюджетних обмежень; стохастичні моделі, що враховують невизначеність у графіках руху та рівні заряду батареї. Wang & Liu (2022) показали, що стохастична оптимізація зарядки дозволяє зменшити пікове навантаження на мережу на 30 % порівняно з традиційними підходами [23]. Це підтверджує ефективність комбінування методів оптимізації з енергетичними моделями.

Оптимізація розташування зарядних станцій не може відбуватись ізольовано від транспортної системи. У сучасних підходах поєднують планування інфраструктури з моделями руху автобусів, що базуються на GPS-даних. Така інтеграція дозволяє прогнозувати затримки, простої та споживання енергії на маршрутах. Дослідження Li et al. (2015) показали, що розташування станцій у пересадкових вузлах підвищує ефективність роботи мережі на 12–18 %, оскільки зарядка поєднується з природними зупинками транспорту [19]. Таким чином, транспортно-енергетичний підхід забезпечує більш реалістичну оцінку ефективності інфраструктури.

Ще одним напрямом оптимізації є поєднання розташування станцій із локальними відновлюваними джерелами енергії (сонячні панелі, вітрові турбіни) та системами зберігання енергії. Lee & Kim (2022) підкреслюють, що «інтеграція зарядних систем у мікромережі знижує залежність від централізованих мереж і скорочує витрати на електроенергію на 22 %» [24].

Цей підхід дозволяє створювати більш стійкі міські енергосистеми, знижувати вуглецевий слід та забезпечувати резервне живлення у пікові години.

Оптимізація розташування зарядних станцій має враховувати не лише технічні, а й соціальні чинники. Це стосується доступності станцій для пасажирів, часу очікування, а також впливу на довкілля. У звіті IEA (2024) зазначається, що «розташування станцій у стратегічних транспортних вузлах сприяє зниженню часу поїздок і підвищує привабливість громадського транспорту для мешканців міст» [25].

Таким чином, поєднання технічних, енергетичних, транспортних та соціально-екологічних факторів формує комплексний підхід до оптимізації розташування зарядної інфраструктури для електробусів.

Економічна доцільність як наслідок оптимізації. Оптимальне розташування зарядних станцій безпосередньо впливає на економічну ефективність електробусного транспорту. По-перше, воно зменшує витрати на інфраструктуру. Як зазначає BloombergNEF (2022), «правильне планування мережі станцій дозволяє уникати дублювання інвестицій і скорочує середню вартість проєкту на десятки відсотків завдяки кращому використанню існуючих енергомереж» [26]. Це особливо важливо для міст із обмеженим бюджетом, де інфраструктурні проєкти потребують максимальної віддачі від вкладених коштів.

По-друге, оптимізація знижує експлуатаційні витрати транспортних операторів. Розташування станцій у стратегічних вузлах маршруту мінімізує простої автобусів і скорочує час у дорозі. Дослідження Volvo Group і KPMG показало, що середнє європейське місто з населенням 500 000 осіб може заощаджувати до 100 млн шведських крон щороку за рахунок переходу на електробуси, причому «ключовим фактором економії є інтеграція зарядної інфраструктури в транспортну логістику» [27].

По-третє, ефективне розміщення станцій сприяє зниженню вартості електроенергії завдяки можливості використовувати нічні тарифи та інтегрувати відновлювані джерела. Liu et al. (2022) довели, що врахування тарифної політики під час планування зарядки дозволяє зменшити витрати на електроенергію на 19–29 % [28]. У поєднанні з довшим строком служби батареї, який забезпечує рівномірне навантаження на мережу, це формує додатковий фінансовий ефект для перевізників.

Нарешті, правильне планування інфраструктури має непрямі економічні переваги. Зменшення викидів CO₂ та шумового забруднення знижує соціальні витрати на охорону здоров'я та покращує якість життя мешканців. За даними IndiaSpend (2023), електробуси «забезпечують на 82 % більший щоденний прибуток порівняно з дизельними», причому цей ефект значною мірою досягається завдяки зменшенню витрат на паливо й обслуговування у правильно організованій інфраструктурі [29].

Економічна доцільність є безпосереднім наслідком оптимізації розташування зарядних станцій: зниження інвестиційних і експлуатаційних витрат поєднується з довгостроковими вигодами від підвищення ефективності транспортної системи та покращення екологічної ситуації в місті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] R. V. Bagach, «Підвищення електромагнітної сумісності та енергоефективності зарядних станцій електромобілів на основі активних випрямлячів,» дис. канд. техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, 2024, 179 с.

[2] A. A. Plakhtiy, V. P. Nerubatskyi, V. E. Kavun, and A. V. Mashura, «Компенсация высших гармоник входных токов в системах с параллельным включением автономных инверторов,» *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, vol. 27, no. 103, pp. 65–74, 2018. <https://doi.org/10.15276/eltecs.27.103.2018.07>

[3] C. Liu, et al., «Planning of Electric Vehicle Charging Stations in Urban Areas Considering Grid Constraints» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 87, pp. 1–15, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>

[4] X. Li, et al., «Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Bus Systems,» *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4587–4606, May 2015. <https://doi.org/10.3390/en80504587>

[5] M. Ghasri, et al., «GIS-Based Location Planning for EV Charging Infrastructure,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, pp. 104157, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104157>

[6] J. Wang and J. Liu, «Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>

[7] J. Zhang, et al., «Renewable Energy Integration for Electric Bus Charging Using GIS,» *eTransportation*, vol. 20, pp. 100210, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2024.100210>

[8] IEEE Xplore, «Dynamic modeling and system-level approaches for EV charging infrastructure planning,» 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10045673>

[9] J. Wang and J. Liu, «Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>

[10] EV Magazine, «Global EV Outlook 2024: Trends in EV Charging,» 2024. [Online]. Available: <https://evmagazine.com/articles/global-ev-outlook-2024-trends-in-ev-charging>

[11] International Energy Agency (IEA), «Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Vehicle Charging,» 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>

[12] Salata Institute, Harvard University, «Urban EV Charging for All,» 2024. [Online]. Available: https://salatainstitute.harvard.edu/wp-content/uploads/2024/06/FINALFINAL_Urban-EV-Charging-For-All.pdf

- [13] B. Peng, Z. Zhang, and Y. Xu, «Deep Learning Based Load Forecasting for EV Charging Networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 4, pp. 3298–3308, Jul. 2024. <https://doi.org/10.1109/TSG.2024.10643227>
- [14] D. Lee and H. Kim, «Optimal Operation of Microgrids with Integrated Electric Bus Charging Systems,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 86, pp. 104010, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104010>
- [15] J. Wang and J. Liu, «Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [16] Z. Zhou, D. Wang, and Y. Huang, «Real-Time Pricing-Based Energy Scheduling for Electric Vehicle Fleets in Smart Grids,» *Energy*, vol. 281, pp. 127290, Mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127290>
- [17] X. Liu, H. Yang, M. Wang, and Y. Wang, «A Review of Energy Management Strategies for Electric Bus Charging Infrastructure,» *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54321–54340, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.10578078>
- [18] C. Liu, et al., «Planning of Electric Vehicle Charging Stations in Urban Areas Considering Grid Constraints» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 87, pp. 1–15, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>
- [19] X. Li, et al., «Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Bus Systems,» *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4587–4606, May 2015. <https://doi.org/10.3390/en80504587>
- [20] Y. Li, et al., «Urban Planning Integration for EV Charging Deployment,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 99, pp. 105032, May 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105032>
- [21] M. Ghasri, et al., «GIS-Based Location Planning for EV Charging Infrastructure,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, pp. 104157, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104157>
- [22] H. Nakanishi, et al., «GIS and Decision Support for Charging Infrastructure,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 10, pp. 6005, May 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20106005>
- [23] J. Wang and J. Liu, «Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [24] D. Lee and H. Kim, «Optimal Operation of Microgrids with Integrated Electric Bus Charging Systems,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 86, pp. 104010, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104010>
- [25] International Energy Agency (IEA), «Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Vehicle Charging,» 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>
- [26] Bloomberg New Energy Finance, «Electric Vehicle Outlook: Urban Bus Economics,» 2022. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook>
- [27] OEM Off-Highway, «Study Finds Cities Running Electric Buses Provides Financial as Well as Environmental Benefits,» 2015. [Online]. Available: <https://www.oemoffhighway.com/market-analysis/trends/press-release/12119230/study-finds-cities-running-electric-buses-provides-financial-as-well-as-environmental-benefits>
- [28] Y. Liu, L. Wang, Z. Zeng, and Y. Bie, «Optimal charging plan for electric bus considering time-of-day electricity tariff,» *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, vol. 5, no. 2, pp. 123–137, 2022. <https://doi.org/10.1108/JICV-04-2022-0008>
- [29] IndiaSpend, «Electric Buses Earn 82% More Profit Than Diesel Daily,» 2023. [Online]. Available: <https://www.indiaspend.com/electric-buses-earn-82-more-profit-than-diesel-daily-85587>

REFERENCES

- [1] R. V. Bagach, «Improving the Electromagnetic Compatibility and Energy Efficiency of Electric Vehicle Charging Stations Based on Active Rectifiers,» Ph.D. dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, 2024, 179 p.

- [2] A. A. Plakhtiy, V. P. Nerubatskyi, V. E. Kavun, and A. V. Mashura, "Compensation of Higher Harmonics of Input Currents in Systems with Parallel Connection of Autonomous Inverters," *Electrical and Computer Systems*, vol. 27, no. 103, pp. 65–74, 2018. <https://doi.org/10.15276/eltecs.27.103.2018.07>
- [3] C. Liu, et al., "Planning of Electric Vehicle Charging Stations in Urban Areas Considering Grid Constraints," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 87, pp. 1–15, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>
- [4] X. Li, et al., "Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Bus Systems," *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4587–4606, May 2015. <https://doi.org/10.3390/en80504587>
- [5] M. Ghasri, et al., "GIS-Based Location Planning for EV Charging Infrastructure," *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, p. 104157, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104157>
- [6] J. Wang and J. Liu, "Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [7] J. Zhang, et al., "Renewable Energy Integration for Electric Bus Charging Using GIS," *eTransportation*, vol. 20, p. 100210, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2024.100210>
- [8] IEEE Xplore, "Dynamic Modeling and System-Level Approaches for EV Charging Infrastructure Planning," 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10045673>
- [9] J. Wang and J. Liu, "Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [10] EV Magazine, "Global EV Outlook 2024: Trends in EV Charging," 2024. [Online]. Available: <https://evmagazine.com/articles/global-ev-outlook-2024-trends-in-ev-charging>
- [11] International Energy Agency (IEA), "Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Vehicle Charging," 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>
- [12] Salata Institute, Harvard University, "Urban EV Charging for All," 2024. [Online]. Available: https://salatainstitute.harvard.edu/wp-content/uploads/2024/06/FINALFINAL_Urban-EV-Charging-For-All.pdf
- [13] B. Peng, Z. Zhang, and Y. Xu, "Deep Learning-Based Load Forecasting for EV Charging Networks," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 4, pp. 3298–3308, Jul. 2024. <https://doi.org/10.1109/TSG.2024.10643227>
- [14] D. Lee and H. Kim, "Optimal Operation of Microgrids with Integrated Electric Bus Charging Systems," *Sustainable Cities and Society*, vol. 86, p. 104010, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104010>
- [15] J. Wang and J. Liu, "Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [16] Z. Zhou, D. Wang, and Y. Huang, "Real-Time Pricing-Based Energy Scheduling for Electric Vehicle Fleets in Smart Grids," *Energy*, vol. 281, p. 127290, Mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127290>
- [17] X. Liu, H. Yang, M. Wang, and Y. Wang, "A Review of Energy Management Strategies for Electric Bus Charging Infrastructure," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54321–54340, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.10578078>
- [18] C. Liu, et al., "Planning of Electric Vehicle Charging Stations in Urban Areas Considering Grid Constraints," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 87, pp. 1–15, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>
- [19] X. Li, et al., "Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Bus Systems," *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4587–4606, May 2015. <https://doi.org/10.3390/en80504587>
- [20] Y. Li, et al., "Urban Planning Integration for EV Charging Deployment," *Sustainable Cities and Society*, vol. 99, p. 105032, May 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105032>
- [21] M. Ghasri, et al., "GIS-Based Location Planning for EV Charging Infrastructure," *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, p. 104157, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104157>

- [22] H. Nakanishi, et al., "GIS and Decision Support for Charging Infrastructure," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 10, p. 6005, May 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20106005>
- [23] J. Wang and J. Liu, "Stochastic Optimization Approaches for Large-Scale EV Charging Scheduling," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4689–4699, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146943>
- [24] D. Lee and H. Kim, "Optimal Operation of Microgrids with Integrated Electric Bus Charging Systems," *Sustainable Cities and Society*, vol. 86, p. 104010, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104010>
- [25] International Energy Agency (IEA), "Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Vehicle Charging," 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>
- [26] Bloomberg New Energy Finance, "Electric Vehicle Outlook: Urban Bus Economics," 2022. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook>
- [27] OEM Off-Highway, "Study Finds Cities Running Electric Buses Provides Financial as Well as Environmental Benefits," 2015. [Online]. Available: <https://www.oemoffhighway.com/market-analysis/trends/press-release/12119230/study-finds-cities-running-electric-buses-provides-financial-as-well-as-environmental-benefits>
- [28] Y. Liu, L. Wang, Z. Zeng, and Y. Bie, "Optimal Charging Plan for Electric Bus Considering Time-of-Day Electricity Tariff," *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, vol. 5, no. 2, pp. 123–137, 2022. <https://doi.org/10.1108/JICV-04-2022-0008>
- [29] IndiaSpend, "Electric Buses Earn 82% More Profit Than Diesel Daily," 2023. [Online]. Available: <https://www.indiaspend.com/electric-buses-earn-82-more-profit-than-diesel-daily-85587>

РЕФЕРАТ

Шепуров К.О. Енергетична оптимізація зарядки електробусів через правильний вибір місць для станцій у міському середовищі / К.О. Шепуров // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У статті розглянуто проблему оптимізації розташування зарядних станцій для електробусів у міському середовищі. Зростання кількості електробусів у громадському транспорті створює потребу не лише в енергоефективних зарядних пристроях, але й у стратегічному плануванні їхньої інфраструктури. Визначено, що саме вибір місць для розташування зарядних станцій є ключовим чинником, який впливає на енергетичну оптимізацію, надійність перевезень, економічну доцільність та екологічний ефект від переходу на електротранспорт. У роботі здійснено огляд сучасних методів планування зарядної інфраструктури: системної динаміки, інтеграції з відновлюваними джерелами енергії, технологій інтелектуального заряджання та багатокритеріального аналізу. Особливу увагу приділено застосуванню геоінформаційних систем (ГІС), які дозволяють комплексно враховувати щільність населення, транспортні потоки, можливості електромереж і плани розвитку міста. Окремо розглянуто алгоритмічні та математичні підходи до оптимізації (лінійне та стохастичне програмування, евристичні методи), що забезпечують більш точне прогнозування потреб і адаптацію системи до змінних умов. Показано, що оптимальне розташування зарядних станцій безпосередньо впливає на економічну ефективність впровадження електробусів. Це проявляється у зниженні інвестиційних витрат на інфраструктуру, скороченні витрат на електроенергію й обслуговування, підвищенні прибутковості перевізників та прискоренні окупності проєктів. Додатково оптимізація сприяє екологічним перевагам: скороченню викидів CO₂, зменшенню шумового забруднення та покращенню якості життя у містах. Результати роботи підкреслюють, що проблема ефективного розташування зарядної інфраструктури має міждисциплінарний характер і є надзвичайно актуальною для сучасного міського транспорту. Рекомендовано інтегрувати підходи ГІС-аналізу, енергетичного моделювання та економічної оцінки у практику міського планування для досягнення сталого розвитку транспортних систем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОБУС, ЗАРЯДНА ІНФРАСТРУКТУРА, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, МІСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

Shepurov K.O. Energy optimization of electric bus charging through the proper selection of station locations in the urban environment. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article addresses the problem of optimizing the location of charging stations for electric buses in urban environments. The growing number of electric buses in public transport requires not only energy-efficient charging devices but also strategic infrastructure planning. It is identified that the placement of charging stations is the key factor affecting energy optimization, service reliability, economic feasibility, and the environmental benefits of transitioning to electric transport. The study provides an overview of modern planning methods for charging infrastructure, including system dynamics, integration with renewable energy sources, smart charging technologies, and multi-criteria analysis. Particular attention is given to the application of Geographic Information Systems (GIS), which allow a comprehensive assessment of population density, passenger flows, grid capacity, and urban development plans. Algorithmic and mathematical approaches (linear and stochastic programming, heuristic methods) are also discussed as tools for more accurate demand forecasting and system adaptation to changing conditions. It is demonstrated that optimal station placement directly impacts the economic efficiency of electric bus deployment. Benefits include reduced infrastructure investment, lower electricity and maintenance costs, higher profitability for operators, and faster project payback. Furthermore, optimization contributes to environmental advantages such as CO₂ emission reduction, noise decrease, and improved urban quality of life. The results highlight that the problem of charging infrastructure placement is interdisciplinary and highly relevant to modern urban transport. It is recommended to integrate GIS analysis, energy modeling, and economic evaluation into urban planning practices to ensure sustainable transport system development.

KEYWORDS: ELECTRIC BUS, CHARGING INFRASTRUCTURE, GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, URBAN TRANSPORT, ENERGY EFFICIENCY.

АВТОР:

Шепуров Кирило Олександрович, аспірант кафедри технічного обслуговування та експлуатації автомобілів, Національний транспортний університет, e-mail: crashday654@gmail.com, тел. +38 098-487-07-18, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, orcid.org/0009-0001-3471-4146

AUTHORS:

Shepurov Kiril, PhD student, Department of Vehicle Maintenance and Operation, crashday654@gmail.com, National Transport University, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, e-mail: crashday654@gmail.com, tel. +38 098-487-07-18, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0009-0001-3471-4146

РЕЦЕНЗЕНТИ:

REVIEWERS:

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗНИКІВ І ІНДИКАТОРІВ ФІНАНСОВОЇ СТІЙКОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ТА ФАКТОРІВ, ЩО ЇЇ ВИЗНАЧАЮТЬ

Атаманчук Д.В., Національний транспортний університет, м. Київ, Україна,
daniilatamanchuk12@gmail.com, orcid.org/0009-0005-1282-9718

CHARACTERIZATION OF INDICATORS OF ENTERPRISES' FINANCIAL STABILITY AND THE FACTORS DETERMINING IT

Atamanchuk D.V., National Transport University, Kyiv, Ukraine, daniilatamanchuk12@gmail.com,
orcid.org/0009-0005-1282-9718

Постановка проблеми. Фінансова стійкість підприємства є одним із найважливіших критеріїв його надійності, інвестиційної привабливості та конкурентоспроможності. У складних ринкових умовах, що характеризуються динамічними змінами економічного середовища, турбулентністю та невизначеністю, дослідження фінансової стійкості набуває особливої актуальності. Категорія дозволяє комплексно оцінити здатність підприємства забезпечувати збалансоване формування та використання ресурсів для реалізації своєї діяльності та забезпечення довготривалої конкурентної переваги. Оскільки ефективне управління стійкістю впливає на можливість уникнення банкрутства та підтримання належного рівня платоспроможності, тема статті є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення фінансової стійкості підприємств здійснювалися багатьма вітчизняними та зарубіжними науковцями. Зокрема, у працях Башнянина та Лінтур висвітлено загальні підходи до трактування поняття фінансової стійкості суб'єктів господарювання та запропоновано шляхи її покращення [1]. Білик, Павловська, Притуляк і Невмержицька розглянули широкий спектр аналітичних методик для оцінювання фінансового стану та стійкості, приділивши особливу увагу фінансовому аналізу як методичній основі [2]. У роботах Вівчар і Кос наведено сучасні методи оцінювання фінансової стійкості, що враховують вплив поточної ринкової кон'юнктури [3]. Необхідність комплексних підходів до оцінки та діагностики фінансової стійкості актуалізовано у дослідженнях Ганіна та Алєкперова, де наголошено на системності управління стійкістю [5].

Серед джерел, що висвітлюють проблематику фінансової стійкості на рівні нормативно-правових аспектів, варто відзначити Господарський кодекс України [6], де закладені основні принципи функціонування суб'єктів, ЗУ "Про бухгалтерський облік та фінансову звітність в Україні" [15], який забезпечує методологічне підґрунтя для формування фінансової звітності та відповідних показників.

Докладні аналітичні підходи до оцінки фінансового стану запропоновано у роботах Коробова [18], де висвітлено методи комплексного аналізу діяльності підприємств на базі обчислення ключових фінансових коефіцієнтів. У дослідженнях Ізюмської та Нікульшиної [16], Довбні та Разганяєвої [8] розглянуто зокрема питання інтегральної оцінки фінансової стійкості з урахуванням макро- та мікроекономічних чинників, що впливають на стан підприємства. У працях Заюкової [14] висвітлено теоретичні аспекти фінансової стійкості та формування підходів до її забезпечення.

Невирішеними залишаються питання ідентифікації найчутливішого впливу на фінансову стійкість та побудови інтегрованих моделей оцінки, які б враховували особливості галузі й специфіку структури капіталу конкретних підприємств. Тому дана стаття присвячена обґрунтуванню й систематизації показників і індикаторів фінансової стійкості, вивченню факторів, які найбільшою мірою впливають на рівень.

Мета статті. Всебічна характеристика системи показників і індикаторів, що дозволяють оцінити фінансову стійкість підприємства, визначення факторів взаємодії, задля розроблення рекомендацій підвищення стійкості та ефективності управління.

Виклад основного матеріалу дослідження. З метою комплексного вимірювання рівня фінансової стабільності та незалежності підприємства доцільно застосовувати систему взаємопов'язаних показників. Серед них визначальну роль відіграють коефіцієнти фінансової стійкості, платоспроможності (абсолютної, термінової і поточної ліквідності), ділової активності і рентабельності (продажів, активів, власного та чистого капіталу).

Економічне оцінювання фінансової стійкості відбувається шляхом аналізу низки відносних показників, які фіксують стан та використання фінансових ресурсів, структуру та джерела фінансування, забезпеченість активів. Для їхнього обчислення зазвичай залучаються дані з офіційної фінансової звітності підприємств у поєднанні з відомостями про обсяги виробництва та реалізації продукції.

Остаточний висновок щодо рівня фінансової стійкості формується на основі порівняння обчислених коефіцієнтів із референсними величинами, що можуть бути нормативними, середньогалузевими чи визначеними для конкуруючої групи підприємств. Застосовують теоретично обґрунтовані або отримані через експертні методи показники, які можуть указувати на оптимальний чи критичний стан з позиції фінансової рівноваги. Вони фактично використовуються як своєрідні нормативи для фінансових коефіцієнтів. Проте універсальної методики їхнього розрахунку, спільної для всіх галузей, досі не розроблено. Крім того, немає і єдиних підходів до вибору переліку відносних показників, що застосовуються під час дослідження фінансової незалежності. У багатьох випадках пропонується надмірна кількість індикаторів, що ускладнює практичне застосування. Таким чином, першочерговим завданням є розроблення оптимального набору коефіцієнтів, які б водночас задовольняли потреби інформаційних користувачів і максимально повно відображали рівень фінансової стійкості та результати господарської діяльності.

Під час обрання пріоритетних показників, які найповніше характеризують промислове підприємство, варто враховувати специфіку його галузі, способи формування та використання фінансових ресурсів, доступність і простоту збирання даних, уникати дублювання оцінок окремих аспектів фінансового стану. Потрібно зберегти комплексність діагностики навіть за обмеженої кількості ключових показників.

Фінансова стійкість підприємства, згідно з поширеними у науковій літературі визначеннями, передбачає здатність компанії забезпечувати оптимальний розподіл та використання власних і залучених коштів для досягнення стратегічних цілей [7; 11]. У межах практичної діяльності вона проявляється в можливості підприємства своєчасно виконувати зобов'язання, забезпечувати додаткову вартість для власників, підтримувати належний рівень конкурентоспроможності та інвестиційної привабливості.

Фінансові кризи різного масштабу породжують чинники, що змінюють на рівень стійкості. Це ускладнює їхню систематизацію та упорядковане групування. На фінансову стійкість можуть впливати чинники, які не залежать від підприємства або знаходяться під його частковим чи повним контролем.

Серед ключових зовнішніх чинників, які визначають стійкість, виділяють: загальноекономічне середовище господарювання; ринкове позиціонування підприємства; рівень платоспроможного попиту споживачів; законодавчу й виконавчу політику держави у фінансово-кредитній сфері; соціально-економічну та екологічну обстановку в країні тощо. Для формування поточної та довгострокової фінансової стійкості однаково потрібними є як сприятливі, так і негативні фактори, оскільки вони визначають загальні умови, в яких веде діяльність підприємство. Сучасні технологічні та соціально-економічні зміни створюють нові можливості та загрози, актуалізують постійний моніторинг факторів впливу.

Поділ чинників на внутрішні та зовнішні з погляду їхнього походження має істотне значення для вибудови дієвої системи управлінських рішень, спрямованих на поліпшення стану.

Зовнішнє середовище охоплює систему умов та факторів, які мають вплив на діяльність, форми і результати його функціонування, що формуються в процесі взаємодії з партнерами, клієнтами і кредиторами. Водночас поява, напрям і рівень впливу зовнішніх чинників значною мірою не залежать від окремого суб'єкта господарювання та є наслідком процесів, що розгортаються у надсистемі вищого рівня. Прийнято розрізняти прямі та опосередковані чинники. До опосередкованих зараховують ті, що не здійснюють негайного й безпосереднього впливу на фінансову стійкість, але в довготривалій перспективі можуть суттєво визначити її рівень. Тому такі фактори необхідно передбачати у планах розвитку та бізнес-стратегіях підприємства, своєчасно ідентифікуючи та оцінюючи їх. Вони часто є складними, а керувати чи повністю контролювати їх практично неможливо, тож організація може лише пом'якшувати їхній можливий негативний стан. Критерії опосередкованого впливу найчастіше поділяють на економічні, ринкові, фінансові, соціально-демографічні, політико-правові, технологічні та загальні.

Натомість до групи зовнішніх чинників прямого впливу відносять взаємовідносини з контрагентами: постачальниками, покупцями, конкурентами, із державою в особі її регулюючих органів. Чинники безпосередньо впливають на господарську діяльність, ринкову

конкурентоспроможність, фінансовий стан і стійкість підприємства. На відміну від опосередкованих, прямі чинники частково піддаються управлінню або коригуванню, що слід враховувати під час застосування аналітичних методів і розроблення механізмів регулювання та управління.

Основними показниками фінансової стійкості традиційно вважаються:

1. Коефіцієнти ліквідності, які показують можливості розраховуватися за поточними зобов'язаннями (покриття, швидкої ліквідності тощо). Хоча вони безпосередньо відносяться до короткострокових аспектів функціонування, їх рівень впливає на загальну оцінку фінансової стабільності [2; 17].

2. Коефіцієнти платоспроможності та автономії, які характеризують структуру капіталу та свідчать про залежність від зовнішніх джерел фінансування, відображають здатність підприємства функціонувати у довгостроковій перспективі [4; 18].

3. Показники рентабельності, що віддзеркалюють ефективність використання ресурсів та розкривають потенційні можливості самофінансування [5].

4. Загальний коефіцієнт фінансової незалежності, що дозволяє визначити частку власних коштів у загальному обсязі джерел фінансування [8].

Окрім традиційних коефіцієнтів, до основних індикаторів фінансової стійкості можуть бути віднесені:

1. Показник покриття відсотків (interest coverage ratio), який визначає, наскільки прибуток підприємства перевищує витрати на обслуговування боргу.

2. Мультиплікатори фінансового важеля (наприклад, debt to equity ratio), що відображають відносну частку боргу у структурі капіталу.

3. Інтегральні показники, сформовані на базі системи вагових коефіцієнтів, що враховують галузеву специфіку (наприклад, Z-рахунок Альтмана як індикатор ймовірності банкрутства, скоригований на особливості фінансового середовища) [1; 14].

Виділяють кілька послідовних кроків, які зазвичай охоплюють загальну оцінку стану суб'єкта господарювання, визначення типу стійкості та подальше дослідження відносних показників. Перша складова полягає у встановленні ресурсної стабільності, стійкості формування капіталу та якості управлінських процесів. При вивченні фінансової звітності, насамперед структури пасиву, стають очевидними можливі причини міцної чи, навпаки, недостатньої фінансової стійкості. Збільшення обсягу капіталу, через акумуляцію нерозподіленого прибутку, є дієвим інструментом зміцнення господарської діяльності, оскільки дає змогу покривати поточні зобов'язання та інвестувати в оборотні активи. Потрібність аналізу складу й структури капіталу пояснюється тим, що статутні та додаткові його елементи дають змогу модернізувати виробництво, залучати висококваліфікованих фахівців і, зрештою, збільшувати ринкову частку. Водночас значна сума власного капіталу підвищує довіру партнерів і полегшує доступ до фінансування, тоді як мала його частка може негативно позначатися на ризиках для потенційних кредиторів.

Для всебічного аналізу треба враховувати ресурсну стабільність підприємства, яка залежить від взаємодії з учасниками ринку, його виробничої інтегрованості, чинного стану економіки та здатності контролювати грошові потоки. Крім того, слід оцінювати рівень управлінської стійкості шляхом аналізу відповідності організаційно-виробничих структур вибраній стратегії розвитку і ринковому попиту.

Наступна оцінка вивчення фінансової стійкості через показники, що характеризують забезпечення запасів та витрат джерелами фінансування. Зазвичай розглядають співвідношення власного оборотного капіталу і запасів, власних та довгострокових позикових ресурсів і запасів, суми фінансування запасів. Виділяють кілька сценаріїв: абсолютну фінансову стійкість, коли виробничі запаси повністю покриваються власним оборотним капіталом; нормальний фінансовий стан, якщо для фінансування запасів залучаються і власні ресурси, і довгострокові кредити; нестійкий, за якого додатково задіяні короткострокові позики; та кризовий, коли джерела фінансування є недостатніми і підприємство фактично перебуває на межі банкрутства. Складовою методології є розрахунок відносних коефіцієнтів, які дають кількісну оцінку фінансовій стійкості. Йдеться про автономію, фінансову залежність, фінансовий ризик, маневреність власного капіталу, фінансову незалежність капіталізованих джерел, структуру покриття довгострокових вкладень, довгострокове залучення позикових коштів, концентрацію залученого капіталу, частку власного капіталу та довготермінових зобов'язань, коефіцієнт поточної заборгованості, показники відображають динаміку змін у часі та рівень відповідності оптимальним або граничним значенням.

Практична цінність описаного підходу - він дає змогу комплексно оцінити стан фінансів і розробити рішення для стабілізації та розвитку підприємства, запобігти настанню кризи або вчасно

реагувати на ознаки загрозової ситуації. За результатами такого аналізу можна виявити як позитивні тенденції, так і наявні проблеми, пов'язані з браком джерел фінансування, низькою ліквідністю чи нестачею власного капіталу, і вжити відповідних заходів для покращення фінансової стабільності.

При розгляді факторів впливу на фінансову стійкість слід розрізняти зовнішні та внутрішні детермінанти [8; 10].

До зовнішніх факторів належать:

4. Макроекономічні умови (загальний рівень інфляції, податкова політика, стабільність фінансових ринків).

5. Рівень конкуренції в галузі, котрий визначає цінові стратегії та величину прибутку.

6. Політико-правові чинники, що впливають на правила ведення бізнесу та доступ до ресурсів [9; 13].

7. До внутрішніх факторів слід віднести:

8. Структуру капіталу, зокрема частку власних та позикових коштів, яка визначає здатність підприємства протистояти кризовим явищам [12; 19].

9. Політику управління оборотними активами, що забезпечує необхідний рівень ліквідності та оборотності матеріальних ресурсів [20].

10. Інвестиційну стратегію, яка впливає на формування потенціалу зростання та використання фінансових ресурсів.

11. Якість менеджменту, що визначає ефективність реалізації фінансово-економічних рішень і загальну культуру управління [16; 21].

Складовою оцінки є ідентифікація «вузьких місць» у фінансовій діяльності, що може бути здійснена через комплексну діагностику господарської діяльності з використанням системи коефіцієнтів, інтегральних показників та порівняльного аналізу з середньогалузевими нормативами [3; 16]. Своєчасне виявлення проблем у структурі капіталу, обігу грошових коштів та прибутковості дає підприємству можливість реагувати на проблеми та ризики та розробляти антикризові заходи.

При розробленні плану підвищення рівня стійкості, потрібно звернути увагу на:

1. Оптимізацію між балансом власних і позикових ресурсів у напрямі зменшення фінансових ризиків.

2. Покращення платоспроможності шляхом ефективного управління оборотним капіталом.

3. Удосконалення системи внутрішнього контролю за рухом коштів, прийняття стратегічних рішень на базі фінансового аналізу.

4. Формування прозорості і достовірної обліково-аналітичної бази, що забезпечить об'єктивність оцінювання стану підприємства зовнішніми користувачами [6; 15].

Така системність в оцінці та управлінні фінансовою стійкістю сприятиме підвищенню конкурентоспроможності й зменшенню ризику банкрутства в сучасних умовах нестабільності.

Галузева специфіка значною мірою впливає на вибір показників оцінювання стійкості, оскільки кожен сектор економіки має власні операційні особливості та різний рівень ризику. Промислові підприємства зазвичай працюють у середовищі зі складною виробничою інфраструктурою, високими капітальними витратами і тривалими виробничими циклами, що зумовлює потребу у глибокому аналізі структури капіталу й довгострокових зобов'язань. Особливу роль тут відіграють коефіцієнти оборотності запасів, ліквідності та показники, пов'язані зі швидкістю оновлення основних фондів. У сфері ІТ фінансова стійкість часто оцінюється крізь призму нематеріальних активів і здатності генерувати високий операційний дохід за відносно незначних інвестицій у матеріальні активи. Сільськогосподарські підприємства найчастіше стикаються з сезонністю виробництва, нестабільністю цін на продукцію та значним впливом природно-кліматичних умов, що передбачає окремий набір чинників ризику й потребує застосування специфічних аналітичних показників, зокрема коефіцієнтів залежності від зовнішнього середовища, а також розрахунку термінів окупності інвестицій із урахуванням врожайності та сезонних коливань.

Інноваційні процеси тісно пов'язані з фінансовою стійкістю, оскільки інвестування у нові продукти і технології може стати джерелом додаткових ризиків, але водночас значно підвищити конкурентоспроможність у довгостроковій перспективі. Компанії з високим рівнем інноваційної активності зазвичай вкладають значні кошти у дослідження й розробки, що може тимчасово знижувати ліквідність і збільшувати потребу в оборотному капіталі. Водночас успішна інноваційна політика здатна забезпечити стабільні джерела прибутку і розширити ринки збуту. Баланс між ризиками й винагородами інноваційної діяльності відображається у фінансових коефіцієнтах, які

враховують структуру витрат на розробку нових продуктів, патентний портфель, а також здатність підприємства адаптуватися до стрімких технологічних змін.

Емпіричні дослідження можуть посилити доказову базу, якщо у статті буде наведено приклади реальних підприємств із різних галузей. Такий підхід допоможе продемонструвати, як на практиці застосовується система показників для оцінювання фінансової стійкості, і дозволить уточнити, наскільки гнучко модель реагує на галузеві й ринкові чинники. Аналіз фінансових звітів конкретних фірм або узагальнення статистичних даних щодо групи підприємств дають змогу виявити спільні тенденції, оцінити вплив обсягів виробництва та структури витрат на здатність підтримувати оптимальне співвідношення власного і позикового капіталу, визначити роль державної підтримки чи зовнішніх інвестицій. Якщо дослідження передбачає економіко-математичне моделювання, зіставлення результатів із реальними даними допомагає перевірити валідність обраних методик і в разі необхідності вдосконалити їх.

Подальші рекомендації для практиків мають охоплювати широкий спектр аспектів, пов'язаних із моніторингом та управлінням фінансовою стійкістю, включаючи вдосконалення обліково-аналітичної системи, регулярний аудит ключових фінансових показників і розробку спеціалізованих програм ризик-менеджменту. Одним із найдієвіших інструментів може стати впровадження автоматизованих систем збору та обробки фінансової інформації, які дають змогу відстежувати не лише базові коефіцієнти ліквідності чи рентабельності, а й динаміку змін у реальному часі. Серед інших важливих заходів можна відзначити формування профільних резервів, застосування страхування від ключових ризиків та оптимізацію підходів до залучення позикових ресурсів. Завдяки впровадженню таких рекомендацій підприємства можуть своєчасно реагувати на ринкові коливання, підвищити конкурентоспроможність і створити передумови для довгострокового зростання.

Формування механізму забезпечення фінансової безпеки підприємства покликане створити умови для своєчасного виявлення потенційних загроз, для їх запобігання і мінімізації впливу на фінансовий стан. Поставлені завдання передбачають оцінювання ймовірності можливих загроз, систематичне відстеження їх фактичного виникнення та реалізацію управлінських заходів для усунення або пом'якшення негативних наслідків.

Сутність механізму фінансової безпеки полягає в тому, що для кожного з аспектів діяльності (виробничого, кадрового, інформаційного тощо) розробляється послідовність дій і методичних підходів, які забезпечують постійний аналіз та контроль над ризиками. Задля ефективності цей процес має бути вбудованим у загальну систему управління підприємством, оскільки тільки комплексний і постійний моніторинг дозволяє оперативно реагувати на потенційні й реальні загрози. Усе це передбачає розробку відповідних інструментів оцінювання фінансової безпеки (наприклад, специфічних показників або індикаторів), засобів, що слугують для підтримання стабільності, серед яких можна згадати фінансове планування, управління грошовими потоками, формування резервів і ресурсів, використання страхових механізмів тощо.

Управлінський аспект означає, що заходи для досягнення фінансової безпеки мають проводитися регулярно, а результати систематично аналізуватися з метою вдосконалення планів і процедур. Ефективне застосування механізму забезпечує створення певного «запасу міцності» — він дає змогу підприємству мати гнучкість і ресурси для своєчасного реагування на кризові явища.

Ключовим елементом механізму фінансової безпеки є оцінка. Вона включає визначення наявних фінансових ресурсів, їх ефективність використання, здатність підприємства залучати додаткові кошти, моніторинг взаємозв'язків із зовнішнім середовищем. Результати оцінювання стають основою для формування необхідного набору управлінських дій, що дають змогу або зберегти, або відновити прийнятний рівень фінансової стійкості. Вибір методів та інструментів (фінансове планування, реінвестування, кредитування тощо) залежить від того, до якого стану фінансової безпеки належить підприємство.

В умовах нестабільності ринку й багатьох ризиків, які можуть негативно впливати на діяльність, формування механізму забезпечення безпеки стає одним із вагомих завдань. Ефективне управління капіталом, ретельне планування грошових потоків та надійна система контролю ризиків становлять основу такого механізму. Його використання дає змогу зменшити залежність від кризових чинників, зберегти платоспроможність та кредитоспроможність підприємства, забезпечити майбутній розвиток.

Фінансова стійкість, будучи багатогранною категорією, формується під впливом сукупності зовнішніх і внутрішніх чинників. Вона відображає, з одного боку, стан фінансових ресурсів та ефективність їх застосування, а з іншого — здатність підприємства оперативно адаптуватися до змін навколишнього середовища. Негативний вплив економічної нестабільності, невизначеність на

фінансових ринках, інфляційні процеси й інші ризики зумовлюють постійну потребу в гнучкому управлінському інструментарії, що передбачає створення й дотримання належних правил, процедур і моделей фінансового аналізу.

Складовою процесу гарантування фінансової безпеки є своєчасна й оцінка стану підприємства. Використовують різноманітні методи, зокрема розрахунок коефіцієнтів і вивчення динаміки їх зміни, аналіз структури капіталу й оборотних коштів, дослідження здатності швидко залучати необхідні ресурси за різних економічних обставин. З огляду на результати, керівництво вживає конкретних заходів, спрямованих на підвищення фінансової стабільності.

Українське суспільство безпосередньо відчуває на собі наслідки економічних процесів та воєнного стану, адже купівельна спроможність і споживчі вподобання населення є ключовими індикаторами рівня життя. Згідно з даними аналітиків компанії Deloitte, у 2023 році на продукти харчування й обов'язкові платежі припадало приблизно 66% середнього бюджету українців, що перевищує глобальний показник у 2,5 рази. Дослідження свідчить, що більшість споживачів в Україні схильні до економії, проте рівень заощаджень варіюється залежно від товарних груп і коливається від 41% до 77% серед респондентів. Найбільші витрати фіксують у внутрішньо переміщених осіб, при цьому на медикаментах, товарах для дітей та готовій їжі заощаджують менше. Поширеною тенденцією стало приготування їжі вдома замість придбання готових страв, скорочення відвідувань ресторанів і барів, закупівля продуктів та ліків "про запас".

Фінансові труднощі населення зумовлені насамперед зниженням реальних доходів. Незважаючи на зростання мінімальної заробітної плати з 6500 грн до 8000 грн у квітні 2024 року, рівень реального ВВП так і не повернувся до довоєнного показника 2021 року. Найбільше падіння (37%) зафіксовано у другому кварталі 2022 року, а певне пожвавлення – на початку 2023-го. Станом на початок 2024 року Україна ще приблизно на чверть не досягла результатів 2021-го, а подальші перспективи значною мірою залишаються невизначеними. Зокрема, можливі відключення електроенергії або тимчасове зупинення роботи підприємств у третьому кварталі 2024 року можуть поглибити негативні тенденції. Утім, ряд провідних національних і міжнародних інституцій загалом прогнозують зростання ВВП України, що коливається від 3,5% до майже 4% залежно від методології та аналітичних моделей [22].

Висновки. Фінансова стійкість підприємства є багатогранною категорією, що визначається комплексом показників і факторів, які потрібно аналізувати у системному взаємозв'язку. Традиційні коефіцієнти та індикатори — ліквідності, платоспроможності, автономії, рентабельності тощо — дозволяють швидко оцінити стан підприємства, однак ефективність управлінських рішень потребує комплексного підходу. Етапом є ідентифікація впливу як зовнішніх, так і внутрішніх чинників.

Дослідження підтвердило необхідність застосування сучасних аналітичних методів і моделей, що дозволяють оперативно виявляти потенційні ризики зниження фінансової стійкості та реалізовувати профілактичні заходи. Перспективним напрямом досліджень є розроблення систем оцінки стійкості, враховуючи галузеву специфіку, дослідження взаємозв'язку між фінансовою стійкістю та інноваційними процесами на підприємстві. Залишається питання вдосконалення вітчизняної нормативно-правової бази у частині регулювання фінансової звітності та стандартів аудиту, що забезпечить вищий рівень достовірності аналітичної інформації та сприятиме формуванню прозорого інвестиційного середовища.

Пропозиції для покращення фінансової стійкості підприємств:

1. Інтеграція сценарних аналізів у фінансове планування: підприємства повинні використовувати кілька сценаріїв для оцінки майбутніх фінансових результатів у різних умовах (наприклад, в умовах економічної кризи, падіння попиту, зміни законодавства).

2. Активізація інвестицій в ІТ та технології: для підвищення конкурентоспроможності підприємства повинні активно інвестувати в інновації, особливо у сферу автоматизації та цифрових технологій. Це дозволить оптимізувати витрати, підвищити ефективність виробничих процесів та оперативно реагувати на зміни попиту.

3. Гнучка адаптація до політико-економічних змін: підприємства повинні мати стратегії, що дозволяють швидко адаптуватися до змін у державній політиці, податкових нормах або зовнішньоекономічних умовах. Це може включати створення «планів Б», які дозволяють швидко реагувати на нові виклики.

4. Гнучкі робочі процеси та віддалена робота: зважаючи на зміни у світі праці (особливо після пандемії та враховуючи війну в країні), підприємства повинні зберігати гнучкість у кадровій політиці, пропонуючи варіанти віддаленої роботи, гнучкого графіка або інші умови, що дозволяють зберігати продуктивність у умовах непередбачуваних змін.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Башнянин Г.І. Фінансова стійкість підприємств: проблематика та можливості покращення // Економічний вісник Запорізької державної інженерної академії. 2016. Вип. 2. С. 98–101.
2. Білик М.Д., Павловська О.В., Притуляк Н.М., Невмержицька Н.Ю. Фінансовий аналіз: навчальний посібник. Київ: КНЕУ, 2014. 592 с.
3. Вівчар О.Й., Кос Т.Ю. Новітні методи оцінювання фінансової стійкості підприємства // Young Scientist. 2023. № 4 (116). С. 115–119.
4. Грабовецький Б.Є. Економічний аналіз: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2013. 85 с.
5. Ганін В., Алекперов Р. Оцінювання системи менеджменту фінансової стійкості підприємств у сучасних економічних умовах // Молодий вчений. 2020. № 11 (87). С. 149–152. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-11-87-32>
6. Господарський кодекс України: Закон України від 16.08.2020 № 436-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/436-15#Text>
7. Голеско І.О. Сутність фінансової стійкості підприємств: економічний зміст і практичні аспекти // Економіка транспортного комплексу. 2017. Вип. 30. С. 49–57.
8. Довбня С.Б., Разганяєва Т.М. Методичні засади визначення фінансової стійкості підприємств з урахуванням зовнішніх чинників // Бізнеснавігатор. 2020. № 3 (59). С. 89–94.
9. Докієнко Л.О. Концептуальні орієнтири комплексної діагностики фінансової стійкості // Підприємництво та інновації. 2020. № 14. С. 25–31.
10. Запатріна І., Лебеда Т. Можливості реформування житлово-комунального господарства // Економіка України. 2012. № 10. С. 34–44.
11. Заюкова М.С. Теорія фінансової стійкості підприємства: монографія. Вінниця: Універсум, 2009. 155 с.
12. Про бухгалтерський облік та фінансову звітність в Україні: Закон України від 16.07.1999 № 996-XIV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/996-14#Text>
13. Ізюмська В.Д., Нікульшина А.Т. Управління фінансовою стійкістю підприємств: сучасні підходи та інструменти. 2021. № 34. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-34-26>
14. Пігуль Н.Г., Клименко А.В., Пігуль Є.І. Методичні аспекти аналізу фінансової стійкості підприємств України // Приазовський економічний вісник. 2019. Вип. 1. С. 186–190.
15. Коробов М.Я. Фінансово-економічний аналіз діяльності підприємств. Київ: Знання, 2010. 378 с.
16. Костирко Л.А., Євтушенко М.В. Фінансова стійкість корпоративних підприємств у вимірі економіко-вартісного тяжіння показників. 2019. № 21. С. 28–33.
17. Костирко Р.О. Фінансовий аналіз. Харків. 2015. 784 с.
18. Юрій Е.О., Бербека Л.А. Дослідження фінансової стійкості в оцінці фінансового стану. 2017. С. 1112–1117.
19. Country Economic Forecast. July 2024. URL: <https://www.oxfordeconomics.com/>
20. S&P знизив рейтинг України за іноземною валютою до «СС» // Interfax-Україна. 2024. URL: <http://surl.li/xkevuu>
21. Рік підготовки до нових викликів // Forbes Ukraine. 2023. URL: <http://surl.li/rdwimg>
22. ICU погіршив прогноз зростання ВВП України у 2024 році // Interfax-Україна. 2024. URL: <http://surl.li/jsaaap>

REFERENCES

1. Bashnyanyn, H. I. (2016). Finansova stiikist pidpryiemstv: problematyka ta mozhlyvosti pokrashchennia [Financial stability of enterprises: issues and ways for improvement]. Ekonomichnyi visnyk Zaporizkoi derzhavnoi inzhenernoi akademii – Economic Bulletin of Zaporizhia State Engineering Academy, 2, 98–101 [in Ukrainian].
2. Bilyk, M. D., Pavlovska, O. V., Prytuliak, N. M., & Nevmerzhytska, N. Yu. (2014). Finansovyi analiz: navchalnyi posibnyk [Financial Analysis: A textbook]. Kyiv: KNEU [in Ukrainian].
3. Vivchar, O. Yu., & Kos, T. Yu. (2023). Novitni metody otsiniuvannia finansovoi stiikosti pidpryiemstva [Modern methods of assessing enterprise financial stability]. Young Scientist, 4(116), 115–119 [in Ukrainian].
4. Hrabovetskyi, B. Ye. (2013). Ekonomichnyi analiz: navchalnyi posibnyk [Economic Analysis: A handbook]. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
5. Hanin, V., & Aliekpierov, R. (2020). Otsiniuvannia systemy menedzhmentu finansovoi stiikosti pidpryiemstv u suchasnykh ekonomichnykh umovakh [Evaluating the management system of enterprises’

financial stability under modern economic conditions]. *Molodyi vchenyi – Young Scientist*, 11(87), 149–152. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-11-87-32> [in Ukrainian].

6. Hospodarskyi kodeks Ukrainy: Zakon Ukrainy vid 16.08.2020 № 436-IV [Commercial Code of Ukraine: Law of Ukraine dated August 16, 2020, No. 436-IV]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/436-15#Text> [in Ukrainian].

7. Holesko, I. O. (2017). Sutnist finansovoi stiikosti pidpriemstv: ekonomichniy zmist i praktychni aspekty [The essence of enterprises' financial stability: economic content and practical aspects]. *Ekonomika transportnoho kompleksu – Economy of the Transport Sector*, 30, 49–57 [in Ukrainian].

8. Dovbnia, S. B., & Razhanaiieva, T. M. (2020). Metodychni zasady vyznachennia finansovoi stiikosti pidpriemstv z urakhuvanniam zovnishnikh chynnykiv [Methodological principles of determining enterprises' financial stability considering external factors]. *Biznesnavihator – Business Navigator*, 3(59), 89–94 [in Ukrainian].

9. Dokiienko, L. O. (2020). Kontseptualni oriientyry kompleksnoi diahnostryky finansovoi stiikosti [Conceptual guidelines for a comprehensive diagnosis of financial stability]. *Pidpriemnytstvo ta innovatsii – Entrepreneurship and Innovation*, 14, 25–31 [in Ukrainian].

10. Zapatrina, I., & Lebeda, T. (2012). Mozhlyvosti reformuvannia zhytlovo-komunalnoho hospodarstva [Prospects for reform in housing and communal services]. *Ekonomika Ukrainy – Economy of Ukraine*, 10, 34–44 [in Ukrainian].

11. Zayukova, M. S. (2009). Teoriia finansovoi stiikosti pidpriemstva: monohrafiia [Theory of Enterprise Financial Stability: A monograph]. Vinnytsia: Universum [in Ukrainian].

12. Pro bukhhaltenskyi oblik ta finansovu zvitnist v Ukraini: Zakon Ukrainy vid 16.07.1999 № 996-XIV [On Accounting and Financial Reporting in Ukraine: Law of Ukraine dated July 16, 1999, No. 996-XIV]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/996-14#Text> [in Ukrainian].

13. Iziumska, V. D., & Nikulshyna, A. T. (2021). Upravlinnia finansovoiu stiikistiu pidpriemstv: suchasni pidkhody ta instrumenty [Managing enterprises' financial stability: modern approaches and tools]. Issue 34. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-34-26> [in Ukrainian].

14. Pihul, N. H., Klymenko, A. V., & Pihul, Ye. I. (2019). Metodychni aspekty analizu finansovoi stiikosti pidpriemstv Ukrainy [Methodological aspects of analyzing Ukrainian enterprises' financial stability]. *Pryazovskyi ekonomichnyi visnyk – Pryazovskyi Economic Bulletin*, 1, 186–190 [in Ukrainian].

15. Korobov, M. Ya. (2010). Finansovo-ekonomichnyi analiz diialnosti pidpriemstv [Financial and Economic Analysis of Enterprise Activity]. Kyiv: Znannia [in Ukrainian].

16. Kostyrko, L. A., & Yevtushenko, M. V. (2019). Finansova stiikist korporatyvnykh pidpriemstv u vymiri ekonomiko-vartisnoho tiazhinnia pokaznykiv [Financial stability of corporate enterprises in terms of economic-value gravity of indicators]. Issue 21, 28–33 [in Ukrainian].

17. Kostyrko, R. O. (2015). Finansovy analizi: navchalnyi posibnyk [Financial Analysis: A teaching manual]. Kharkiv: Faktor [in Ukrainian].

18. Yurii, E. O., & Berbeka, L. A. (2017). Doslidzhennia finansovoi stiikosti v otsintsi finansovoho stanu [Research on financial stability in assessing the financial condition]. *Molodyi vchenyi – Young Scientist*, 10, 1112–1117 [in Ukrainian].

19. Country Economic Forecast (July 2024). Retrieved from <https://www.oxfordeconomics.com/> [in English].

20. S&P znyzylo reitynh Ukrainy za inozemnoiu valiutoiu do “CC” [S&P downgraded Ukraine's foreign currency rating to “CC”]. (2024). Interfax-Ukraine. Retrieved from <http://surl.li/xkevuu> [in Ukrainian].

21. Rik pidhotovky do novykh vyklykiv [A year of preparation for new challenges]. (2023). Forbes Ukraine. Retrieved from <http://surl.li/rdwmig> [in Ukrainian].

22. ICU pohirshyv prohnaz zrostannia VVP Ukrainy u 2024 rotsi [ICU worsened Ukraine's GDP growth forecast for 2024]. (2024). Interfax-Ukraine. Retrieved from <http://surl.li/jsaaap> [in Ukrainian].

РЕФЕРАТ

Атаманчук Д.В. Характеристика показателей и индикаторов финансовой устойчивости предприятий та факторов, що її визначають / Д.В. Атаманчук // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Економічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип.1 (60).

Стаття присвячена визначенню ключових показників і індикаторів для оцінки фінансової стійкості підприємств, виявленню основних внутрішніх і зовнішніх факторів, що на неї впливають. Розглянуто критерії ліквідності, платоспроможності, автономії та рентабельності як базові аналітичні інструменти. Встановлено, що фактори макроекономічного середовища, конкурентне середовище,

структура капіталу й ефективність управлінських рішень формують інтегральний показник фінансової стійкості. Наголошено на необхідності комплексного підходу до фінансового аналізу з урахуванням галузевої специфіки та застосуванням інноваційних методик. Результати можуть бути корисними для широкого кола фахівців у галузі фінансового менеджменту та управління підприємствами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ФІНАНСОВА СТІЙКІСТЬ, ЛІКВІДНІСТЬ, ПЛАТОСПРОМОЖНІСТЬ, СТРУКТУРА КАПІТАЛУ, АНАЛІЗ, УПРАВЛІНСЬКІ РІШЕННЯ.

ABSTRACT

Atamanchuk D. V. Characterization of Indicators of Enterprises' Financial Stability and the Factors Determining It. Visnyk National Transport University. Series «Economic sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article focuses on identifying the key indicators and metrics used to assess the financial stability of enterprises, as well as determining the main internal and external factors influencing it. Liquidity, solvency, autonomy, and profitability criteria are considered basic analytical tools. It is established that macroeconomic conditions, the competitive environment, the structure of capital, and the effectiveness of managerial decisions form an integral indicator of financial stability. The importance of a comprehensive approach to financial analysis, which takes into account industry-specific features and employs innovative methodologies, is highlighted. The results can be useful for a wide range of specialists in financial management and enterprise administration.

KEYWORDS: FINANCIAL STABILITY, LIQUIDITY, SOLVENCY, CAPITAL STRUCTURE, ANALYSIS, MANAGERIAL DECISIONS.

АВТОР:

Атаманчук Даниїл Валерійович, аспірант, Національний транспортний університет, daniilatamanchuk12@gmail.com, +380630773336, Україна, 01010, Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0009-0005-1282-9718

AUTHORS:

Atamanchuk Daniil Valeriyovich, postgraduate, National Transport University, daniilatamanchuk12@gmail.com, tel. +380630773336, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, orcid.org/0009-0005-1282-9718

РЕЦЕНЗЕНТИ:

REVIEWERS:

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ГУМАНІТАРИЗАЦІЇ ВИЩОЇ ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ

Глушенюк Н.М., кандидат історичних наук, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, natalia1978@i.ua, orcid.org/0000-0001-6840-3795

Гержод Г.І., кандидат історичних наук, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, gergaliv@ukr.net, orcid.org/0009-0008-7984-8288

CURRENT PROBLEMS OF HUMANITARIZATION OF HIGHER VOCATIONAL EDUCATION

Glushenok N.M., Candidate of Historical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, natalia1978@i.ua, orcid.org/0000-0001-6840-3795

Gerzhod G.I., Candidate of Historical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, gergaliv@ukr.net, orcid.org/0009-0008-7984-8288

Гуманітаризація освіти є одним з найважливіших принципів, що відображає сучасні суспільні тенденції розвитку вищої освіти. Її метою є формування фахівця, який вміє працювати в колективі та реалізовувати свої творчі здібності, знає історію та традиції свого народу. Адже, окрім професійних знань і навичок, сучасний фахівець має бути носієм високої загальної культури, яку формують гуманітарні та суспільні дисципліни. Гуманітарні знання допомагають фахівцю стати не тільки виконавцем, але й професійним творцем. У зв'язку з цим актуальною проблемою вищої технічної освіти, поряд з якісною спеціалізованою професійною підготовкою, є надання студентам гуманітарної підготовки, гуманітаризація та гуманізація вищої освіти.

Варто зазначити, що в європейських країнах процес реформування вищої освіти здійснюється давно і системно. Кінець XX – початок XXI століття стали періодом глибоких трансформацій у суспільно-політичному житті європейських країн та реального зближення європейських систем вищої освіти. Як наслідок, система професійної освіти європейських країн продемонструвала адаптивність і стійкість до суспільних змін. З огляду на це, сучасна концепція вищої освіти в Україні має створюватися з урахуванням історичних уроків розвитку національної освіти та зарубіжного досвіду професійної підготовки фахівців, на основі результатів творчих пошуків педагогічних колективів і окремих вчених України.

Проблеми гуманізації та гуманітаризації освіти мають велике наукове і практичне значення, викликають жвавий інтерес науковців і є предметом широкого обговорення в науковій літературі.

Загальні проблеми гуманізації і гуманітаризації освіти розглядають у своїх роботах М. Дмитриченко, Б. Хорошун [1], О. Шевченко [2], В. Половець [3], О. Сук [4], Г. Онкович [5], Ю. Зінковський [6], С. Сисоєва [7], В. Сиволога [8], О. Олійник [9].

Зарубіжний досвід гуманізації вищої освіти в найзагальніших рисах розкрито в дослідженнях А. Ржевської [10], В. Кундрика [11]. Найпопулярнішою країною для дослідження вищої освіти серед українських науковців залишаються США. Педагогічний досвід Великої Британії, Франції, Польщі, Угорщини, Німеччини також часто висвітлюється в сучасній вітчизняній історіографії.

Тобто, в останні десятиліття питанням гуманітаризації вищої освіти приділяється значна увага з метою пошуку цілісної теорії формування фахівця-професіонала. Однак, незважаючи на велику різноманітність поставлених наукових проблем і глибину їх вивчення, окремі їх аспекти залишаються невирішеними в сучасній вітчизняній науці. Так, бракує комплексних досліджень, які б характеризували процес гуманітаризації професійної освіти у вищих навчальних закладах країн Західної Європи та США з точки зору його теоретичної і практичної цінності та доцільності використання окремих ідей і практичних здобутків.

Метою нашого дослідження є висвітлення особливостей гуманітарної підготовки майбутніх фахівців у вищій технічній освіті та дослідження моделей гуманітарно орієнтованої підготовки з урахуванням зарубіжного досвіду.

Основна частина

Безперечно, сучасною стратегією у сфері освіти є досягнення якості, що відповідає вимогам XXI століття. Новітні тенденції побудови освітніх моделей передбачають трансформацію змісту

освіти таким чином, щоб він відповідав потребам і запитам тих, хто навчається. Такий підхід до розробки моделей сприяє швидкому подоланню соціальних протиріч.

Саме тому важливою є гуманітаризація освіти. Основна суть гуманітаризації полягає в забезпеченні всебічного загальнокультурного розвитку, формуванні гармонійної, цілісної особистості, що розглядається як важлива передумова і суттєвий чинник її професійного становлення та самореалізації.

Одним з основних шляхів переходу на нову парадигму освіти, на думку С. Сисоевої, є вироблення стратегії розвитку гуманітарної освіти в технічних та інших вищих навчальних закладах освіти, перспектив відродження й розвитку національної вищої школи, нових педагогічних технологій та інших змін [7].

Варто зауважити, що гуманітаризація передбачає, перш за все, залучення молоді до гуманітарної культури людства. Іншими словами, гуманітаризація зазвичай розглядається як додатковий і необхідний компонент професійної освіти. Гуманітаризація освіти переслідує дві основні і взаємопов'язані цілі: по-перше, вона спрямована на подолання «одновимірності» молодого фахівця, яка задається професійною підготовкою; по-друге, вона спрямована на закладення в молодого фахівця основ гуманістичного світогляду. Іншими словами, гуманітаризація розглядається як спосіб залучення молоді до духовних цінностей цивілізованого світу, як її самовдосконалення в широкому розумінні цього слова, що аж ніяк не обмежується вузькопрофесійною підготовкою [8, с. 282].

Слід пам'ятати, що професія допомагає людині функціонально інтегруватися в суспільство, в розгалужену систему соціальної діяльності завдяки своїм навичкам і вмінням. Однак, окрім цієї функціональної адаптації до суспільства через професію, людині також необхідно інтегруватися в культуру, засвоїти її смисли і цінності. Це завоювання, а точніше, привласнення смислів і цінностей гуманістичної культури формує духовність особистості, її світогляд, розуміння свого місця і ролі в суспільстві [8, с. 282].

Також необхідно зупинитись на тому аспекті, що гуманітаризація освіти тісно пов'язана з гуманізацією. Гуманізація вищої освіти – це світогляд і діяльнісний підхід до освіти, який не тільки визнає, а й утверджує цінність студента як особистості, його право на якісну освіту, свободу вибору, розвиток і прояв своїх здібностей.

У вузькому розумінні гуманізація розглядається як прояв нового педагогічного мислення, пов'язаного з поверненням гуманістичного змісту системі освіти (орієнтації на розвиток особистості) і боротьбі з перетворенням її в утилітарне навчання конкретному аспекту професійних знань і умінь. У широкому – це складне системне (інтегративне) утворення, основним завданням якого є створення усіх умов для розкриття здібностей особистості, задоволення потреб особистості в інтелектуальному, духовному, моральному, етичному та фізичному розвитку. [12, с. 6].

У цьому визначенні гуманітаризація освіти є однією з основних частин і засобів гуманізації освіти. Необхідність гуманітаризації сучасної освіти зумовлена змінами в суспільстві, політичній та економічній сферах в Україні. Освіта має забезпечити руйнування старих стереотипів мислення, має перейти від ідеологічного примусу і загальної посередності, нівелювання особистості кожної людини, до проголошення її найважливішою цінністю держави, до підкреслення примату духовних загальнолюдських цінностей.

Ідея гуманізації не є принципово новою, вона активно застосовується в освітніх системах розвинених країн. Європейські університети зможуть йти в ногу з міжнародним розвитком лише за умови підтримки загальної освіти, тобто гуманітарних і соціальних наук, та розвитку міждисциплінарних навичок, умінь і компетенцій [10, с. 22]. Залежно від реального стану, особливостей освітніх і соціальних процесів у тій чи іншій країні пріоритети надаються тим чи іншим аспектам гуманітаризації..

Загалом усі відомі існуючі освітні технології можна поділити на енциклопедичні, прагматичні та фундаментальні. Енциклопедична освіта передбачає всебічне накопичення людиною знань, що просто неможливо за сучасного обсягу цих знань [4, с. 21]. Адже в наш час неможливо озброїти людину знаннями на все життя; обсяг інформації зростає швидше, ніж здатність її засвоєння.

Прагматичний метод широко поширений в університетах США та деяких країнах Західної Європи. Відповідно до нього ефективно оволодіння досягається лише тими знаннями, які необхідні самому профільному фахівцеві. Наприклад, у США вищі навчальні заклади при викладанні окремих предметів керуються попиту на ринку, який формують роботодавці. Вони готують висококваліфікованих робітників, які після закінчення вищої початкової школи можуть одразу приступити до роботи [11, с. 216].

Такі спеціалісти можуть працювати досить ефективно, але дуже короткий час: «для них дуже швидко настає момент, коли потрібно щось змінити або розширити сферу своєї роботи, що вимагає додаткових знань, насамперед фундаментальних, але вони їх не мають... головне, що до цього немає звички і внутрішньої потреби» [4, с. 19].

Дефіцит гуманістичного виховання і тісно пов'язаної з ним гуманітарної освіти в університетах все більше відчувається через орієнтацію студентів на підготовку до вузькоспеціальної діяльності.

Тому американські освітні експерти обґрунтували висновки про те, що інженерна освіта має забезпечувати широку, а не вузькоспеціалізовану підготовку, бути проблемною, а не дисциплінарно орієнтованою. Тобто йдеться про підготовку всебічно розвинутих спеціалістів, здатних самостверджуватися та розкриватися, приймати рішення в складних умовах, готових до постійного підвищення кваліфікації, а також до поєднання особистих інтересів із суспільними [3, с. 108-113].

Реформи американської системи освіти знайшли відображення в перегляді структури, змісту, методів і форм гуманізації та гуманітаризації вищої освіти США. Серед концепцій гуманізації та гуманітаризації освіти найбільшою популярністю користувалася концепція фахівця в галузі гуманітарної освіти Б. Кіні. Так, в американській науці існують різноманітні гуманістичні напрями, що розглядають своїм предметом особистість, яка спочатку прагне до самоактуалізації та саморозвитку [5, с. 77].

У європейських країнах (Франція, Німеччина, Велика Британія), як видно з порівняльних педагогічних даних, забезпечення професійної мобільності шляхом фундаменталізації та гуманітаризації освіти є одним із пріоритетних напрямків удосконалення освітніх технологій. А гуманітарна підготовка фахівця будь-якого профілю є більш важливою частиною загальної політики вищої освіти.

Підвищення професійного рівня неможливе без нових підходів до організації самостійної роботи студентів та індивідуально-консультативної роботи викладачів зі студентами. Наприклад, у Великій Британії, де кожен університет має власну систему підготовки, 60% навчального часу витрачається на самостійне вивчення рекомендованої літератури та навчально-методичних матеріалів, 10% – на навчальні теле- та радіопрограми, 15% – на роботу з викладачем і 15% – на практичні роботи та письмові контрольні роботи. Самостійне вивчення літератури передбачає процес ознайомлення з матеріалом, його розуміння і остаточне обговорення з групою та викладачем під час практичних занять. Що стосується індивідуальних занять та письмових іспитів, очікується, що кожен студент самостійно досліджуватиме певну тему, оцінюватиме її та пояснюватиме.

Натомість в Україні виникає нове осмислення ролі та місця гуманітарної сфери в розвитку суспільства. Таким чином, у сучасній українській системі освіти гуманітаризація має передбачати переорієнтацію пріоритетів у визначенні виховних ідеалів – спрямування освітнього процесу насамперед на формування духовного світу особистості, утвердження духовних цінностей як першоджерела у визначенні мети та змісту освіти, гуманізацію знань, формування гармонійної, цілісної картини світу з повним відтворенням світу культури та світу людини [2, с. 70-71]. Розглядаючи профільні програми підготовки з точки зору реформування системи вищої освіти в Україні, слід уточнити деякі основні поняття. Гуманітаризація освіти у вищій школі не може обмежуватися доповненням навчального плану новими предметами. Зрештою, різниця між гуманітарними та природничими науками відносна. Великий гуманістичний потенціал мають математика і природничі науки. Тому будь-який конфлікт між роллю гуманітарних, суспільних та природничих наук у формуванні духовності та розкритті творчого потенціалу особистості неприйнятний. Гуманітаризація змісту природничо-технічної освіти полягає насамперед у наданні особистісно значущих знань, що містяться в цьому змісті, на основі виявлення їх індивідуальних і опосередкованих зв'язків з людиною і суспільством, усвідомленні цих знань не лише як важливого елемента загальнолюдської культури, а й як елемента культури кожної сучасної людини [2, с. 74].

Тому головним елементом удосконалення навчально-виховного процесу має стати включення природничо-технічних дисциплін до навчальних планів базової гуманітарної підготовки, а отже, циклу гуманітарних дисциплін – до базової природничо-технічної підготовки. Крім того, цей процес не можна розглядати як просте змішування вже відомих предметів. Мова йде про створення нового покоління проблемно-орієнтованих курсів [13, с. 79-81].

З цього випливає, що гуманітарні та природничі знання представляють різні образи однієї дійсності. Природниче наукове пізнання має свій предмет, який є об'єктивною частиною цієї реальності, що може бути описана за допомогою формальної логіки. Предметом гуманістичного

пізнання є процес формування об'єктивної дійсності, тобто суб'єктивна діяльність. Зрештою, суб'єкт – одне і те ж, тільки різними способами.

Гуманітарні науки ХХІ століття виявляють таку тенденцію та особливість гуманітарної освіти, як міждисциплінарність. По-перше, ця тенденція проявляється в тісному взаємозв'язку гуманітарних і практичних курсів на основі поєднання спеціально виділених «блоків» і галузей естетики, етики, філософії, психологічних тренінгів з формування «відчуття впевненості в собі» тощо. Цей міждисциплінарний комплекс має стати основою гуманітарного знання, оскільки поєднує в собі значний теоретичний пласт і подальше практичне застосування. По-друге, в міждисциплінарному підході чітко простежується тенденція до створення «блоку» гуманітарних і природничих наук. Ця опція виявляє ідентичність із моделлю НТС (наука, техніка, суспільство), яка є основою більшості інтегрованих курсів у США, розроблених і впроваджених у навчальний процес («Технології в літературі», «Технології та соціальні цінності», «Соціальний вплив соціального прогресу», «Релігія та соціальні науки»). Реформи американської системи освіти відобразилися на структурі змісту, методах і формах інтеграції гуманітарних дисциплін у вищій освіті США [8].

Дослідники виділяють загальноосвітні та психологічні умови, що сприяють формуванню наукових понять на міждисциплінарній основі: 1) узгоджене вивчення окремих навчальних дисциплін у встановлені терміни, кожна з яких спирається на попередню концептуальну базу та готує студентів до успішного засвоєння понять наступної дисципліни; 2) необхідність забезпечення наступності та узгодженості в розвитку понять; загальні для ряду дисциплін поняття повинні постійно розвиватися, наповнюватися новим змістом, збагачуватися новими зв'язками; 3) єдність у тлумаченні загальнонаукових понять; 4) усунення повторення одних і тих же понять при вивченні різних дисциплін; 5) реалізація єдиного підходу до виявлення тотожних категорій понять [9]. Основним механізмом удосконалення структури моделі знань у системі навчальних дисциплін має стати принцип міждисциплінарної інтеграції, що перетворює всю систему навчання на теоретико-технологічний і методичний засіб побудови моделей професійної діяльності.

Висновки.

Високий рівень підготовки сучасного фахівця вимагає докорінної зміни освітньої сфери та освітньої політики України. Сучасна освіта, яка ґрунтується на набутті спеціальних наукових знань, має бути розширена гуманітарною освітою, орієнтованою на світоглядне знання. Але не лише механічним збільшенням кількості гуманітарних дисциплін, а й укоріненням гуманітарних дисциплін, усвідомленням пріоритету гуманітарної освіти. Ми погоджуємося з думкою дослідників, які вважають, що у студентів необхідно формувати вміння свідомо використовувати потенціал гуманітарних і фундаментальних дисциплін для комплексного та цілісного вирішення професійних завдань. Це можливо лише на основі міждисциплінарної інтеграції, нової освітньої концепції загальноосвітньої спеціальності вищого навчального закладу. На сьогоднішній день намітилося декілька тенденцій гуманітаризації вищої освіти. По-перше, це проникнення гуманітарних знань у зміст природничих наук і технічних дисциплін. По-друге, переорієнтація історичних частин соціально-економічних курсів на гуманітарну спрямованість. По-третє, всебічне засвоєння теоретичних знань про людину, закладених у систему природничих наук. По-четверте, це курси з історії різних сфер гуманітарної культури (філософії, літератури, образотворчого мистецтва, музики), які останніми роками безпосередньо впроваджуються в навчальний процес.

Багато проблем модернізації системи освіти в Україні можна вирішити, використовуючи зарубіжний досвід. В українському науковому середовищі сьогодні найпопулярнішими країнами для вивчення педагогічного досвіду є США, Велика Британія, Франція, Німеччина, Польща. Для українських освітніх політиків особливо важливою є інформація про реформи законодавства країн Західної Європи 2000-х років, спрямовані на забезпечення якості освіти у вищих навчальних закладах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дмитриченко М.Ф., Хорошун Б.І., Язвінська О.М., Глушенюк Н.М. Фундаменталізація вищої технічної освіти та її гуманітарна складова. Вісник Національного транспортного університету: В 2-х частинах: Ч. 1. К.: НТУ, 2009. С. 3-8.
2. Шевченко О., Скляр П., Третяченко В. Соціально-психологічні моделі та механізми професійного становлення майбутніх фахівців у вищій школі: монографія. Луганськ, 2011. 240 с.
3. Половець В.М. Гуманізація і гуманітаризація освіти. Вища школа: проблеми, пошуки, тенденції. Вип. 4. Чернівці. 2003. С.2-6.

4.Сук О.П. Системний підхід до інформатизації освіти. Фундаменталізація вищої освіти – необхідна умова випуску конкурентноспроможних фахівців: Матеріали міжнародної науково-методичної конференції 11-13 квітня 2001. Харків: НТУ. 2001.

5.Онкович Г. Міждисциплінарна інтеграція в гуманітарних дослідженнях. Вища освіта України. 2009. № 1. С. 73-81.

6.Зінковський Ю., Мірських Г. Креативність – фрактал сучасної парадигми вищої технічної освіти (стаття друга). Вища освіта України. 2007. № 4. С.11-17.

7. Сиволога В.Ф. Гуманізація та гуманітаризація вищої освіти. Дослідження політичної взаємодії в умовах трансформації суспільства: зб. наук. праць. Одеса: ОНУ, 2013. С. 266–286.

8. Шевчук Т. Гуманітарна підготовка в технічних ВНЗ України. Нова педагогічна думка. 2016. № 1. с. 19-22.

9.Олійник О. Особливості гуманітарної підготовки та професійної компетентності студентів у технічних ВНЗ. Донецький вісник наукового товариства ім. Т. Г. Шевченка. Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. 252 с.

10.Ржевська А.В. Розвиток сучасної університетської освіти країн Західної Європи: монографія. Луганськ, 2011. 356 с.

11.Кундрік В.А. Інновації в навчальному процесі вищих навчальних закладів: міжнародний та національний досвід. Науковий вісник Закарпатського державного університету. Ужгород, 2008.

12. Сидоренко В.К. Актуальні проблеми фундаменталізації вищої освіти в Україні. Уч. записки КГІПУ. Вип.5. Сімферополь, 2004.

13. Дутка Г.Я. Філософські та загальнонаукові передумови фундаменталізації змісту професійної освіти. Педагогіка і психологія професійної освіти. 2004. №6. С. 18-24.

REFERENCES

1. Dmytrychenko, M.F., Khoroshun, B.I., Yazvins'ka, O.M., Hlushenok, N.M. (2009) Fundamentalizatsiya vyshchoyi tekhnichnoyi osvity ta yiyi humanitarna skladova [Fundamentalization of higher technical education and its humanitarian component]. Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University, 1, 3-8 [in Ukrainian].

2. Shevchenko, O., Sklyar, P., Tret'yachenko, V. (2011) Sotsial'no-psykholohichni modeli ta mekhanizmy profesiynoho stanovlennya maybutnikh fakhivtsiv u vyshchiy shkoli [Socio-psychological models and mechanisms of professional development of future specialists in higher education] 240 [in Ukrainian].

3. Polovets', V.M. (2003) Humanizatsiya i humanitaryzatsiya osvity [Humanization and humanitarianization of education]. Vyshcha shkola: problemy, poshuky, tendentsiyi – Higher school: problems, searches, trends, 4, 2-6 [in Ukrainian].

4. Suk, O.P (2001) Systemnyy pidkhid do informatyzatsiyi osvity [Systematic approach to informatization of education]. Fundamentalizatsiya vyshchoyi osvity – neobkhidna umova vypusku konkurentnospromozhnykh fakhivtsiv: Materialy mizhnarodnoyi naukovo-metodychnoyi konferentsiyi 11-13 kvitnya 2001. Kharkiv: NTU – Fundamentalization of higher education is a necessary condition for the graduation of competitive specialists: Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference of April 11-13, 2001. Kharkiv: NTU. [in Ukrainian].

5. Onkovych, H. (2009) Mizhdystsyplinarna intehtratsiya v humanitarnykh doslidzhennyakh [Interdisciplinary integration in humanitarian studies]. Vyshcha osvita Ukrayiny- Higher education of Ukraine, 1, 73-81 [in Ukrainian].

6. Zin'kovs'ky, YU., Mirs'kykh, H. (2007) Kreatyvnist' – fraktal suchasnoyi paradyhmy vyshchoyi tekhnichnoyi osvity [Creativity – a fractal of the modern paradigm of higher technical education]. Vyshcha osvita Ukrayiny – Higher Education of Ukraine, 4, 11-17 [in Ukrainian].

7. Syvoloha, V.F. (2013) Humanizatsiya ta humanitaryzatsiya vyshchoyi osvity [Humanization and humanitarianization of higher education]. Doslidzhennya politychnoyi vzayemodiyi v umovakh transformatsiyi suspil'stva: zb. nauk. prats' – Research on political interaction in the context of society transformation: collection of scientific works, 266–286 [in Ukrainian].

8. Shevchuk, T. (2016) Humanitarna pidhotovka v tekhnichnykh VNZ Ukrayiny [Humanitarian training in technical universities of Ukraine]. Nova pedahohichna dumka – New pedagogical thought, 1, 19-22 [in Ukrainian].

9. Oliynyk, O. (2009) Osoblyvosti humanitarnoyi pidhotovky ta profesiynoyi kompetentnosti studentiv u tekhnichnykh VNZ [Donetsk Bulletin of the T. G. Shevchenko Scientific Society]. Donetsk'yy

visnyk naukovoho tovarystva im. T. H. Shevchenka – Donetsk Bulletin of the T. G. Shevchenko Scientific Society, 252 [in Ukrainian].

10. Rzhavs'ka, A.V. (2011) Rozvytok suchasnoyi universytet-s'koyi osvity krayin Zakhidnoyi Yevropy [Development of modern university education in Western European countries] 356 [in Ukrainian].

11. Kundryk, V.A. (2008) Innovatsiyi v navchal'nomu protsesi vyshchych navchal'nykh zakladiv: mizhnarodnyy ta natsional'nyy dosvid [Innovations in the educational process of higher educational institutions: international and national experience]. Naukovyy visnyk Zakarpat-s'koho derzhavnogo universytetu – Scientific Bulletin of the Transcarpathian State University [in Ukrainian].

12. Sydorenko, V.K. (2004) Aktual'ni problemy fundamentalizatsiyi vyshchoyi osvity v Ukrayini [Current problems of fundamentalization of higher education in Ukraine]. Uch. zapysky K·HYPU – Academic notes of the KGIPU, 5 [in Ukrainian].

13. Dutka, H. (2004) Filosofs'ki ta zahal'nonaukovi peredumovy fundamentalizatsiyi zmistu profesiynoyi osvity [Philosophical and general scientific prerequisites for the fundamentalization of the content of vocational education]. Pedahohika i psykholohiya profesiynoyi osvity – Pedagogy and psychology of professional education, 6, 18–24 [in Ukrainian].

РЕФЕРАТ

Глушенок Н.М. Актуальні проблеми гуманітаризації вищої професійної освіти / Н.М. Глушенок, Г.І. Гержод // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Економічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип.1 (60).

В статті досліджено гуманітаризацію освіти, як один з найважливіших принципів, що відображає сучасні суспільні тенденції розвитку вищої освіти. Основна суть гуманітаризації полягає в забезпеченні всебічного загальнокультурного розвитку, формуванні гармонійної, цілісної особистості, що розглядається як важлива передумова і суттєвий чинник її професійного становлення та самореалізації. У зв'язку з цим актуальною проблемою вищої технічної освіти, поряд з якісною спеціалізованою професійною підготовкою, є надання студентам гуманітарної підготовки, гуманітаризація та гуманізація вищої освіти.

Метою нашого дослідження є висвітлення особливостей гуманітарної підготовки майбутніх фахівців у вищій технічній освіті та дослідження моделей гуманітарно орієнтованої підготовки з урахуванням зарубіжного досвіду.

У статті наголошується, що гуманітаризація освіти тісно пов'язана з гуманізацією. Визначається, що гуманітаризація освіти є однією з основних частин і засобів гуманізації освіти. Стверджується, що необхідність гуманітаризації сучасної освіти зумовлена змінами в суспільстві, політичній та економічній сферах в Україні.

Розглядається застосування ідеї гуманітаризації в освітніх системах європейських країн. Визначається, що у європейських країнах (Франція, Німеччина, Велика Британія) забезпечення професійної мобільності шляхом фундаменталізації та гуманітаризації освіти є одним із пріоритетних напрямків удосконалення освітніх технологій. А гуманітарна підготовка фахівця будь-якого профілю є більш важливою частиною загальної політики вищої освіти.

Зроблено висновок, що сучасна освіта має бути розширена гуманітарною складовою, орієнтованою на світоглядне знання. У студентів необхідно формувати вміння свідомо використовувати потенціал гуманітарних і фундаментальних дисциплін для комплексного та цілісного вирішення професійних завдань. Це можливо лише на основі міждисциплінарної інтеграції, нової освітньої концепції загальноосвітньої спеціальності вищого навчального закладу а також використовуючи зарубіжний досвід.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГУМАНІТАРИЗАЦІЯ ОСВІТИ, ФУНДАМЕНТАЛІЗАЦІЯ, МІЖДИСЦИПЛІНАРНА ІНТЕГРАЦІЯ, ЗАРУБІЖНИЙ ДОСВІД, ВИЩА ТЕХНІЧНА ОСВІТА

ABSTRACT

Glushenok N.M., Gerzhod G.I. Actual problems of humanization of higher professional education. Visnyk National Transport University. Series «Economic sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article examines the humanization of education as one of the most important principles that reflects modern social trends in the development of higher education. The main essence of humanization is to ensure comprehensive general cultural development, the formation of a harmonious, holistic personality, which is considered an important prerequisite and an essential factor in its professional formation and self-realization. In this regard, an urgent problem of higher technical education, along with high-quality

specialized professional training, is to provide students with humanitarian training, humanization and humanization of higher education.

The purpose of our study is to highlight the peculiarities of humanitarian training of future specialists in higher technical education and to study models of humanitarian-oriented training based on foreign experience.

The article emphasizes that the humanization of education is closely related to humanization. It is determined that humanization of education is one of the main parts and means of humanization of education. It is argued that the need for humanization of modern education is due to changes in society, political and economic spheres in Ukraine.

The article considers the application of the idea of humanization in the educational systems of European countries. It is determined that in European countries (France, Germany, Great Britain), ensuring professional mobility through the fundamentalization and humanization of education is one of the priority areas for improving educational technologies. And the humanitarian training of a specialist of any profile is a more important part of the general policy of higher education.

It is concluded that modern education should be expanded with a humanitarian component focused on worldview knowledge. Students need to develop the ability to consciously use the potential of the humanities and fundamental disciplines to solve professional problems in a comprehensive and holistic manner. This is possible only on the basis of interdisciplinary integration, a new educational concept of a general education specialty of a higher education institution, and using foreign experience.

KEY WORDS: HUMANIZATION OF EDUCATION, FUNDAMENTALIZATION, INTERDISCIPLINARY INTEGRATION, FOREIGN EXPERIENCE, HIGHER TECHNICAL EDUCATION

АВТОРИ:

Глушенок Наталія Миколаївна, кандидат історичних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри теорії та історії держави і права, e-mail: natalia1978@i.ua, тел. 0971238815, к.316. вул. М. Бойчука, 42, м. Київ, Україна, orcid.org/0000-0001-6840-3795

Гержод Галина Іванівна, кандидат історичних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри теорії та історії держави і права, e-mail: gergaliv@ukr.net, тел. 0664667028, к.316. вул. М. Бойчука, 42, м. Київ, Україна

AUTHORS:

Glushenok Nataliia Mykolaivna, PhD in History, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Theory and History of State and Law, e-mail: natalia1978@i.ua, tel. 0971238815, room 316. 42, M. Boichuk Str., Kyiv, Ukraine, orcid.org/0000-0001-6840-3795

Gerzhod Halyna Ivanivna, PhD in History, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Theory and History of State and Law, e-mail: gergaliv@ukr.net, tel. 0664667028, room 316. 42, M. Boichuk str., Kyiv, Ukraine

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Харченко Лариса Миколаївна, кандидат філософських наук, доцент кафедри філософії і соціальної антропології імені професора І.П. Стогнія Університету Григорія Сковороди в Переяславі

Левенець Олександр Миколайович, доктор філософії (за спеціальністю 032 «Історія та археологія») кафедри теорії та історії держави і права Національного транспортного університету.

REVIEWER:

Larysa Mykolaivna Kharchenko, Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Philosophy and Social Anthropology named after Professor I.P. Stogniy at the Hryhorii Skovoroda University in Pereiaslav

Oleksandr Mykolayovych Levenets, Doctor of Philosophy (specializing in 032 "History and Archaeology") at the Department of Theory and History of States and Law at the National Transport University.

КАДРОВИЙ ПОТЕНЦІАЛ МОРСЬКОЇ ГАЛУЗІ: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Голубкова І.А., доктор економічних наук, Національний університет Одеська морська академія, prof.irinagolubkova@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9931-8291

HUMAN RESOURCE POTENTIAL IN THE MARITIME SECTOR: CHALLENGES AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Golubkova I.A. Doctor of Economics, National University Odessa Maritime Academy, Odesa, Ukraine, prof.irinagolubkova@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9931-8291

Постановка проблеми у загальному вигляді. Морська галузь України стоїть перед викликами, зумовленими не тільки жакхливими результатами повномасштабної агресії РФ та економічною ситуацією в державі, а й адаптацією до нових стандартів міжнародної торгівлі, екологічних вимог і розвитку новітніх технологій. Одним із наслідків недосконалої кадрової політики є обмежений потенціал підприємств морегосподарського комплексу для повноцінного використання кваліфікаційних можливостей своїх працівників. Це зумовлює не тільки зниження продуктивності праці, а й негативно впливає на рівень інноваційності та впровадження передових технологій.

Проблеми країни, зокрема пов'язані з російсько-українською війною, що триває, низький рівень оплати праці та недостатній рівень професійної підготовки кадрів, значно знижують морально-мотиваційний потенціал працівників, що перешкоджає реструктуризації і розвитку підприємств морської інфраструктури.

У контексті післявоєнного стану, поступової інтеграції України до світової економіки і посилення конкурентоспроможності нашої держави, підвищення кадрового потенціалу морської галузі є важливим стратегічним завданням. Це не тільки покращить ефективність функціонування підприємств на внутрішньому та зовнішньому ринках, але й сприятиме забезпеченню розвитку висококваліфікованих фахівців, здатних адаптуватися до вимог сучасної морської індустрії та впроваджувати інноваційні технології. Тому актуальність теми дослідження, що стосується вдосконалення кадрового потенціалу морської галузі, є особливо високою на сучасному етапі, коли розвиток інфраструктури, модернізація портів та забезпечення морських перевезень є важливими складовими економічного відновлення України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розпочато вирішення даної проблеми і на які спирається автор. З усіх систем менеджменту, управління кадровим потенціалом є центральним і найважливішим завданням, тому що все інше залежить від того, наскільки добре воно виконується [1].

Нині існує багато думок щодо змісту понять «кадровий потенціал підприємства, система управління персоналом». Теоретичні підходи до визначення вказаних понять пропонують Осовська Г. В., Балабанова Л. В., Гурченков О. П., Донець Л. Е., Погорелова Т. О., Позднякова Л. О., Никифорова В. Г., Криворучко О. М., Стеценко Н.А. та інші фахівці [2 – 10]. Однак, їх роботи не відображають особливості сучасного стану умов існуючих загроз і невизначеності, швидких технологічних змін.

Постановка завдання: – теоретично та практично обґрунтувати напрямки розвитку кадрового потенціалу морської галузі.

Виклад основного матеріалу

Морська галузь відноситься до сектору, який охоплює транспортну, логістичну, нормативну, інженерну і інформаційну технології, фінансову та страхову діяльність, пов'язану з суднами, судноплаванням, суднобудуванням. Це складна галузь, яка відіграє вирішальну роль у глобальних ланцюгах поставок.

Морська галузь включає в себе судноплавання та порти, термінали, суднобудування та всі пов'язані з нею сервісні послуги, які сприяють світовій торгівлі. Стратегічне значення морської діяльності поширюється на національну безпеку, міжнародні відносини та захист морських екосистем.

За даними Комісії ООН з питань розвитку та торгівлі (*UNCTAD*), понад 80% міжнародної торгівлі товарами здійснюється шляхом морських перевезень. *UNCTAD* прогнозує: у період 2025–

2029 років загальний обсяг морської торгівлі зростатиме в середньому на 2,4% на рік, а контейнерна торгівля – на 2,7% [11].

У своєму аналізі глобальних морських тенденцій UNCTAD наголошує на стійкості судноплавства, незважаючи на серйозні проблеми, пов'язані з глобальними кризами, такими як війна в Україні та на Близькому Сході. В умовах турбулентного глобального ландшафту, позначеного геополітичними подіями, морська галузь продемонструвала надзвичайну стійкість.

Станом на січень 2023 року світовий флот налічував 105493 судна валовою місткістю 100 брутто-реєстрових і більше тон. За 2023 рік сукупна провізна здатність збільшилася на 3,2% і досягла 2,4 млрд. тон дедвейту. З 1980 по 2024 р. світовий торговельний флот (за загальним дедвейтом) зріс у 3,5 рази. 10 найбільших судноплавних компаній світу у 2025 році налічують 3622 судна, які забезпечують 84,6% світового ринку контейнерної морської торгівлі [12].

У світі існує понад 2000 морських портів. Порти з обсягом вантажообігу понад 10 млн. т входять до найбільших: Роттердам, Сінгапур, Шанхай, Нагоя, Йокогама, Кобе, Новий Орлеан, Нью-Йорк, Філадельфія, Антверпен, Гавр, Марсель, Лондон та інші.

Стан вітчизняного флоту є катастрофічним. Понад нормативний строк експлуатується 70% загальної кількості суден. Український цивільний дуже малий і продовжує зменшуватись. Судна в Україні невеликі і з малою осадкою переважно класу «річка-море». Завдяки цьому вони можуть заходити до дунайських портів, що стало зараз у нагоді. Щодо міжнародних перевезень, то залишилось десь 20 суден під прапором України, а їх середній вік перевищує 35 років.

За даними UNCTAD, на 1 січня 1993 року сукупний дедвейт торговельного флоту України нараховував 6,18 млн т, а частка українського флоту у світовому торговельному флоті становила 0,9%. На 1 січня 2024 року дедвейт флоту, зареєстрованого під прапором України, скоротився більш ніж у 16 разів – до 381 тис. т., а частка у світовому торговельному флоті зменшилася до 0,018%.

Як наслідок, українські моряки змушені працювати не на українських, а на закордонних судах, де більш високі соціальні стандарти.

Міжнародний правовий режим торговельного судноплавства формують чотири основні міжнародні конвенції. Україна є стороною лише трьох. Залишається нератифікованою ключова конвенція – про працю в морському судноплавстві від 2006 року. Це фундаментальний документ – «білль про права моряків», як його називають. Держава, що входить у число лідерів за кількістю моряків у світі, досі не ратифікувала базовий документ про права моряків. Це абсолютно безглуздо і незрозуміло.

Сучасні ринки та промислові структури дедалі частіше набувають транснаціонального характеру, що, поряд із безперервними технологічними змінами, вимагає нових підходів до управління працею. У минулі епохи робота переважно включала взаємодію з природою чи технікою, тоді як у постіндустріальному світі її основою стають комунікація та співпраця між людьми.

У цьому контексті сучасна економіка акцентує увагу на розвитку творчого потенціалу та висококваліфікованої робочої сили, які виступають основними драйверами економічного зростання [13]. Особливо це стосується стратегічно важливої морської галузі, де кадровий потенціал є визначальним фактором для забезпечення стабільності, безпеки та конкурентоспроможності. В умовах зростаючих загроз та невизначеності, збільшенню обсягів міжнародних морських перевезень якість управління людськими ресурсами стає критично важливою.

Морська індустрія, що забезпечує транспортування понад 80% світової торгівлі товарами, сильно залежить від професійної підготовки кадрів, яка безпосередньо впливає на безпеку, ефективність судноплавства та дотримання міжнародних стандартів.

Забезпечення якісної експлуатації суден неможливе без надійного забезпечення та управління кваліфікованими моряками. У 2021 році згідно звіту, підготовленому Міжнародної морської радою (ІМО), на світовому ринку працювало приблизно 1,9 млн. моряків. Із загальної кількості – понад мільйон людей є рядовими членами екіпажу, а близько 900 тисяч – офіцерами [14]. Це свідчить про те, що в сучасному морському флоті існує чітка ієрархія, а також необхідність у професійній підготовці та навчанні для зайняття різних посад на судах. При цьому станом на 27.07.2024 р. дефіцит командного складу на світовому торговельному флоті досяг найвищого показника за останні 17 років. Так, нестача оцінюється в 9%, тоді як рік тому було 5%. Це відповідає прогнозам згідно з якими до 2026 року цей дефіцит збільшиться до 20%, а відчутний дефіцит кваліфікованих кадрів залишається серйозною проблемою [15].

Ці обставини вимагають значних інвестицій у навчання, сертифікацію та підвищення кваліфікації працівників, що є необхідним кроком для забезпечення відповідності галузі сучасним стандартам і викликам. Важливо зазначити, що міжнародні стандарти, такі як STCW (Міжнародна

конвенція з підготовки та дипломування моряків), встановлюють жорсткі вимоги до кваліфікації кадрів у морській галузі, і недотримання цих стандартів може призвести до серйозних економічних втрат і підвищених ризиків на морі.

Крім моряків, важливими складовими кадрового потенціалу є працівники портової інфраструктури, менеджери, фахівці з логістики, інженери та експерти з управління ризиками, які забезпечують безперервне функціонування судноплавства, обслуговування суден та координацію процесів на міжнародному рівні. Кадровий потенціал у морській галузі є фундаментальною основою для її стабільного розвитку, забезпечення безпеки судноплавства, конкурентоспроможності на міжнародному ринку та досягнення екологічних цілей. (табл. 1).

Таблиця 1 – Сутність кадрового потенціалу у морській галузі
Table 1 – Essence of human resource potential in the maritime industry

Складові кадрового потенціалу	Опис
Кваліфікації та навички	Рівень освіти, професійні навички, додаткові курси та сертифікати
Досвід роботи	Рівень досвіду відповідно до конкретної сфери або посади
Мотивація	Інтерес до роботи, мотиваційні фактори, стимулюючі програми
Лідерські якості	Здатність до керівництва, спроможність мотивувати та навчати колег
Комунікативні навички	Здатність ефективно спілкуватися та взаємодіяти з колегами
Адаптивність	Здатність адаптуватися до змін в організаційному середовищі та вирішувати проблеми
Творчий потенціал	Здатність до творчого мислення та пошуку нових ідей та рішень
Професійний розвиток	Бажання та здатність до постійного вдосконалення навичок та знань
Ефективність роботи в команді	Здатність працювати в команді та досягати спільних цілей
Відповідальність	Готовність взяти на себе відповідальність за виконану роботу

Джерело: складено автором на основі [16]

В умовах глобальних змін у морській галузі не лише кількісний ріст персоналу, але й підвищення якості підготовки є визначальним. Це вимагає адаптації системи управління кадровим потенціалом, що має враховувати сучасні потреби та тенденції розвитку галузі.

Основною метою створення кадрового потенціалу морської галузі є забезпечення підприємства необхідними трудовими ресурсами, здатними вирішувати проблеми та досягати поставлених перед підприємством цілей на даний момент і в перспективі.

Термін «кадровий потенціал» став загальним під час переходу від великого розширення виробництва до дрібного. Це була своєрідна відповідь науки на необхідність практики забезпечити якісне підвищення формування та використання відповідних здібностей працівника як колективного ресурсу виробництва та управління.

Кадровий потенціал у морській галузі складається з багатьох взаємопов'язаних елементів, які забезпечують її ефективне функціонування та розвиток. Тому ідентифіковано основні складові кадрового потенціалу: професійні знання та навички, мотивація та психологічні характеристики, освітній рівень, адаптивність та інноваційність, кваліфікація та сертифікація, досвід роботи, комунікативні навички [17].

Однією з основних складових є професійна підготовка та освітній рівень працівників. Морська галузь вимагає спеціалізованих знань і навичок, що включають теоретичну базу, практичний досвід і обов'язкове володіння міжнародними стандартами, такими як SOLAS, MARPOL та STCW. Ці знання забезпечують здатність персоналу виконувати свої функції відповідно до міжнародних вимог [18].

В економічній теорії ефективність вимірюється на основі цілей, поставлених перед початком роботи, отриманих результатів і ресурсів, витрачених на ці зусилля. Для кадрового потенціалу морської галузі ефективність використання підприємства можна представити у відсотках від результату, який кількісно визначає ступінь досягнення мети (соціальної, економічної), а також кількість і якість зайнятих, здібностей персоналу та його досягнення.

Рівень освіти та кваліфікації, необхідний моряку, визначається його посадою на борту судна. Наприклад, капітан повинен мати вищу освіту та значний досвід, тоді як для матроса вимоги є менш високими. Окремі посади можуть потребувати спеціалізованих знань і навичок, зокрема у сферах навігації, технічного обслуговування, електроніки або медицини.

Реальні приклади впровадження навчальних програм у морській галузі підкреслюють важливість професійних знань та навичок. Наприклад, компанія Maersk реалізувала програму обслуговування обладнання та ефективна комунікація на борту. Згідно з даними компанії, завдяки цій програмі кількість інцидентів зменшилася на 25% за останні п'ять років [19].

Інший приклад – курс підвищення кваліфікації, реалізований компанією Carnival Cruise Line, який охоплює управління кризовими ситуаціями. Результати показали, що 95% учасників відзначили покращення своїх навичок у вирішенні конфліктів і управлінні стресом після завершення курсу [20].

Зростання складності морських операцій і розвиток новітніх технологій вимагають від працівників регулярного оновлення знань і навичок. Постійне навчання, підвищення кваліфікації та отримання нових сертифікатів є критичними для адаптації до сучасних умов. Професійні підготовлені фахівці підвищують рівень безпеки на борту суден, ефективно реагуючи на надзвичайні ситуації та запобігаючи аваріям. Інвестиції в розвиток кадрового потенціалу забезпечують не тільки безпеку, а й ефективність морських перевезень.

Щодо кваліфікації та сертифікації це є невід'ємним елементом кадрового потенціалу в морській індустрії, оскільки вони безпосередньо впливають на рівень підготовки працівників. Це, у свою чергу, має важливе значення для забезпечення безпеки, ефективності та конкурентоспроможності морських перевезень. Згідно з даними Міжнародної морської організації (ІМО), належна кваліфікація моряків суттєво знижує ризик виникнення аварій, оскільки професійні підготовлені фахівці здатні своєчасно реагувати на надзвичайні ситуації.

Сертифікація, у свою чергу, є процесом офіційного підтвердження професійної кваліфікації працівників шляхом надання офіційних документів, що засвідчують їхні знання і навички. Цей процес включає в себе теоретичні та практичні іспити, які проводяться компетентними органами або акредитованими установами. Наприклад, сертифікати STCW, видані після успішного проходження курсів, є обов'язковими для всіх моряків, які прагнуть працювати на міжнародних торгових суднах.

Розуміння основних аспектів кваліфікації та сертифікації, визначених міжнародними нормами, дозволяє чітко встановити вимоги до підготовки фахівців, забезпечуючи високий рівень безпеки та ефективності морських перевезень. Основні аспекти кваліфікації та сертифікації в морській галузі зображені в табл. 2.

Таблиця 2 – Основні аспекти кваліфікації та сертифікації в морській галузі
Table – Key aspects of qualification and certification in the maritime industry

Аспект	Опис	Приклади
Кваліфікація	Процес навчання, що охоплює теоретичні та практичні знання у певній спеціалізації.	Навчальні програми у вищих навчальних закладах морської освіти, курси підвищення кваліфікації для моряків.
Сертифікація	Офіційне підтвердження знань і навичок, яке надається після успішного проходження іспитів.	Сертифікати STCW, сертифікати на управління рятувальними шлюпками, сертифікація на роботі з небезпечними вантажами тощо.

Джерело: складено автором за даними [21]

Досвідчені працівники зазвичай займають керівні позиції, де їхній практичний досвід дозволяє успішно координувати дії команди та впроваджувати нові технології і процедури. Дослідження, проведене ІМО в 2023 році, вказує на те, що команди з високим рівнем досвіду в управлінні небезпечними вантажами мають на 40% менше інцидентів під час перевезення у порівнянні з командами, які складаються з менш досвідчених членів. Це свідчить про те, що досвід роботи безпосередньо корелює з безпекою та ефективністю морських операцій.

Мотивація в морській індустрії може бути визначена як сукупність факторів, які спонукають моряків виконувати свої професійні обов'язки. Вона охоплює як зовнішні, так і внутрішні стимули (табл. 3).

Психологічні характеристики моряків, такі як стресстійкість, емоційна стабільність і здатність до адаптації, також відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки та ефективності морських операцій. У морській індустрії моряки піддаються високому рівню стресу через тривалі періоди відсутності зв'язку з родиною, а також через фізичні і емоційні навантаження. Дослідження показують, що близько 60% моряків відчувають стрес під час роботи.

Таблиця 3 – Зовнішні та внутрішні мотиватори для моряків
Table 3 – External and internal motivators for seafarers

Мотиватор	Категорія	Опис	Приклади
1	2	3	4
1			
Зовнішні мотиватори	Фінансова винагорода	Заробітна плата та бонуси відіграють ключову роль у задоволеності працівників. Рівень оплати залежить від спеціалізації та досвіду.	Заробітна плата від \$3,000 до \$12,000 на місяць (ІМО)
	Соціальні переваги	Пільги, що включають медичне страхування, можливості навчання та кар'єрного росту, забезпечують мотивацію та додаткову підтримку.	Медичне страхування, підтримка у навчанні
Внутрішні мотиватори	Професійний розвиток	Працівники прагнуть підвищувати кваліфікацію, розширювати навички та знання.	Участь у тренінгах, курсах підвищення кваліфікації
	Відчуття виконання обов'язків	Усвідомлення важливості своєї ролі, особливо з огляду на безпеку, підвищує мотивацію і відповідальність у роботі.	Сильна внутрішня мотивація, орієнтована на безпеку та результат

Джерело: складено автором за даними [22]

Значну роль відіграє міжкультурна компетенція, адже морська галузь є глобальною і часто передбачає взаємодію з представниками різних національностей. Володіння іноземними мовами, особливо англійською, розуміння культурних відмінностей і здатність до продуктивного міжкультурного діалогу є важливими факторами, що сприяють успішній співпраці.

Таким чином, кадровий потенціал морської галузі базується на інтеграції освіти, компетенцій, досвіду, мотивації та адаптивності. Його розвиток є стратегічно важливим для забезпечення ефективності, безпеки та конкурентоспроможності галузі.

Будь-який персонал підприємства морської галузі можливо розглядати насамперед за структурними особливостями, а саме: організаційна, функціональна, штатна, соціальна, компетентна-правова структури. За думками Міжнародної морської організації (ІМО), цифровізацію та автоматизацію можна зарахувати до числа технологій, які допоможуть країнам на шляху до чистішого, екологічнішого та ефективнішого судноплавства, але це не означає ігнорування людського фактору. Навпаки, ми повинні переконатися, що добробут моряків належним чином враховується, так само як ми повинні забезпечити, щоб нинішні та майбутні моряки були належним чином навчені працювати з мінливими технологіями, продовжуючи сприяти різноманітності та гендерному паритету в морському судноплавстві.

Щоб сприяти найму та утриманню моряків, важливо забезпечити повну дотримання їхніх прав, закріплених у Конвенції про працю в морському судноплавстві, і допомогти їм підготуватися до поточних і майбутніх технологічних розробок. Тому лідери ІМО вітають роботу, яка проводиться в рамках проекту Transport 2040 за підтримки ITF [22].

Україна історично є одним з головних учасників міжнародного ринку морської робочої сили. З початком війни за різними оцінками в Україні – до 100 000 моряків. Українські моряки працюють переважно на судах іноземних власників. У 90% випадків вони працюють під «великими» прапорами, такими як Ліберія, Панама, Маршаллові Острови, Гонконг, Сінгапур та інші. У довоєнний час українські моряки приносили країні \$ 3-4 млрд. щороку. Зараз цьому не сприяє війна та складна економічна ситуація в країні; з другого боку ми маємо значний потенціал в підготовці, перепідготовці та працевлаштуванні моряків, який складається з низки освітніх заходів різних ступенів акредитації, обладнаних сучасним спеціалізованим устаткуванням тренінгових центрів, відлагодженої системи сертифікації та значною кількістю кріюінгових компаній, які спеціалізуються на питанні працевлаштування моряків. Кріюінгові компанії класифікуються за різними ознаками: частка ринку кріюінгу, рід діяльності, взаємодії з іншими організаціями, спеціалізаціями кандидатів або типів суден, засіб працевлаштування тощо.

Працевлаштуванням моряків до війни займалося близько 500 крюїнгових агентств і компаній, зареєстрованих в Україні, з них 270 знаходилися в Одесі. Лідерами крюїнгового ринку останні роки є Marlow Navigation Ukraine, MSC Ship-management Ltd та V. Ships Ukraine. Крюїнгові компанії є важливим елементом інфраструктури морського сегмента ринку праці, яка побудована на взаємодії ринків посередницьких послуг – в першу чергу послуг з працевлаштування, а також медичних послуг, освітніх послуг, транспортних послуг, державних послуг, побутових послуг і так далі. Всі види ринків взаємопов'язані, визначають ринкову вартість морської робочої сили і забезпечують повноцінне функціонування морського сегмента ринку праці.

Послуги з супроводу морських кадрів не обмежуються тільки набором і відбором моряків. Найголовнішими проблемами багатьох крюїнгових організацій за умов військового стану є: «старіння», тобто нестача висококваліфікованих кадрів, які мають поглиблену практичну спеціалізацію у суміші із робочим віком; непідготовленість, тобто занадто повільна розробка антикризових програм з управління кадрами крюїнгових компаній, а це, своєю чергою, вплинуло на здійснення спонтанних кадрових заходів – різких скорочень та найму молодих кадрів, що викликають опір у основного, досвідченого, екіпажу; спад рівня мотивації, зменшення впливу стимулів у моряків та співробітників крюїнгу, ріст ризиків.

Мотивація співробітників (працівників порту, офісу) та кадрів (моряків) знижується через страхи, породжені війною. Стандартний список загроз розширюється особистими побоюваннями працівників, пов'язаними з їхнім фінансовим станом, безпекою, здоров'ям близьких та сімейною ситуацією. Люди справляються з цим по-різному, але навколишні зміни відчують усі. У випадку, коли комерційний взаємозв'язок інтересів замовника та посередника враховує і особисті матеріальні та нематеріальні інтереси моряка, у підсумку отримуємо вмотивованого найманого працівника. Грамотний рекрутинг, навчання і розвиток морських фахівців є основою створення згуртованої команди, та ефективної діяльності морської компанії. Формування бази висококваліфікованих кадрів є складним, трудомістким процесом, який вимагає часу, розробленої системи дій і володіння знаннями морської галузі. Взаємодію елементів структури ринку праці моряків можна побачити на рис. 1. Кількість українських моряків за час повномасштабного вторгнення майже не змінилась. На початок 2022 року більше 60% наших моряків було у рейсах за межами країни, і вони не повернулися. Моряки – це потужне джерело валютних надходжень до України – так було до 24 лютого 2022 року. Ми, як держава, повинні зберегти той пул моряків, який є, щоб витримати конкуренцію у світі. Є проблеми з виїздом за кордон моряків. Дозволи на виїзд видає територіальний центр комплектування та соціальної підтримки ЗСУ. Такі дозволи майже не видаються морякам. Посилення обмежень щодо виїзду чоловіків за кордон та певні натяки на припинення консульського обслуговування матимуть негативний ефект для економіки – адже ті українські моряки, які зараз працюють на іноземних судах, шукатимуть будь-які можливості для виведення коштів з українських банків, припинять грошові перекази в Україну.

Досить гостра проблема – продовження строку документів у моряків, хто знаходиться за межами держави. Документи видаються, але дуже довго. Адміністративні послуги для моряків в Україні є великою проблемою з березня 2020 року – ще з часів COVID-19. Послуги або не надавалися зовсім, або мали чітку корупційну складову. Особливо з початком повномасштабного вторгнення. Багато іноземних морських адміністрацій взагалі пропонують своїм судовласникам замінити українських моряків через ситуацію з документами, бо це створює ризики затримання суден у разі їх перевірки. До того ж дуже мало судовласників з початком війни припинили брати на роботу росіян. Переважно судовласнику байдуже, хто йде до нього працювати – росіянин чи українець. Тож, зараз росіяни захоплюватимуть цей ринок праці, а українським морякам буде потім дуже складно відновити на ньому свої позиції.

В середньостроковій перспективі взагалі утворюється критична ситуація. Українські моряки разом зі своїми родинами вже формують для себе «зони комфорту» в іноземних державах, налагоджують побут. Якщо ситуація не зміниться в найближчий час, Україна точно втратить найбільш кваліфікованих та талановитих професіоналів.

З 1 вересня 2023 року Міжнародна федерація транспортних робітників (ITF) та Міжнародний переговорний форум (IBF) визнали Чорне та Азовське моря «зоною воєнних дій» і «зоною підвищеного ризику». Це впливає на компенсації. Моряки, що працюють на судах, покритих колективними угодами стандарту IBF та ТСС, і перебувають або проходять транзитом у цих зонах, мають право на отримання бонусу у розмірі 100% базової заробітної платні. Цей бонус має нараховуватись впродовж 5 днів після заходу судна у таку зону і далі за кожен день фактичного перебування там.

Безумовно, підвищення зарплат, особливо для моряків, що направляються в небезпечні райони світу (через будь-які умови, включно – військові, карантинні обмеження) є обов'язковою умовою підвищення рівня мотивації. Необхідні введення в систему мотивації кадрів кріюінгового підприємства



Рисунок 1 – Послуги з супроводу морських кадрів

Figure 1 – Seafarer Support Services

Джерело: складено автором за даними [23]

Ці методи негрошової мотивації всього персоналу – і моряків, і працівників кріюінгового підприємства, набули особливого поширення за умов військового стану: – **Підвищена турбота про здоров'я моряків** (доступна інформація про захворюваність, засоби індивідуального захисту, регулярні опитування та медичні огляди в портах, контроль переробок та турбота про відновлення); – **Екологічний офбордінг для співробітників офісу** (гідна вихідна допомога, допомога в отриманні держпідтримки або допомоги від приватних фондів, допомога у працевлаштуванні (написання рекомендацій), можливість повторного прийому на роботу); – **Культура визнання заслуг та досягнень** (система нематеріального заохочення, бонусна система, інструменти соціального визнання досягнень, культура позитивного зворотного зв'язку, визнання вкладу та ризиків); – **Вирішення проблем та допомога у задоволенні потреб на суші** (надання необхідних ресурсів удома, підтримка сім'ї, допомога у створенні прийнятних робочих умов для кріюінг-менеджерів вдома, оптимізація комунікації онлайн); – **Гарантія репатріації та безпеки** (наявність договорів з компаніями щодо повернення додому при будь-яких умовах, чітко прописані в контракті умови маршруту і план дій у надзвичайних ситуаціях).

Ще одним важливим кроком є активна співпраця України з міжнародними організаціями у сфері морської освіти, зокрема з ІМО, яка може допомогти у розробці спільних програм підготовки кадрів та обміні досвідом. Участь у міжнародних навчальних програмах також дозволить державі інтегрувати свої морегосподарські операції в глобальні логістичні мережі та залучити додаткові інвестиції в модернізацію морської інфраструктури.

Завдяки таким ініціативам, Україна зможе не лише підвищити рівень підготовки кадрів, а й забезпечити стійкий розвиток морської галузі, що стане важливим післявоєнним елементом у підтримці конкурентоспроможності на світовому ринку.

Основні напрями [24] підвищення ефективності управління кадровим потенціалом морегосподарського комплексу України в умовах військового стану, а також при відновленні підприємств морської галузі у післявоєнний період відновлення країни:

1. Удосконалення усіх складових морської галузі (традиції суднобудування і судноремонту, системи сервісних послуг, необхідні зміни у вітчизняне морське право), структури управління галуззю, децентралізація більшості функцій, визначення повноважень керівництва з урахуванням кваліфікацій та особистих якостей.

2. Автоматизація та організація робочих місць працівників, їх планування та обладнання, забезпечення оптимальних умов праці.

3. Вироблення стратегії розвитку підприємства на основі аналізу її сильних і слабких сторін, розроблення філософії і політики, що охоплює деякі зі сфер функціонування організації морської галузі.

4. Розроблення інформаційної системи підприємств морської галузі, що забезпечує ефективний комунікаційний зв'язок між співробітниками і підрозділами.

5. Розроблення системи прийняття рішень, правил і процедур управління, системи стимулювання співробітників.

6. Розроблення системи підбору, навчання, оцінки і переміщення керівних кадрів, планування кар'єри керівників, застосування стилю керівництва, адекватного внутрішнім і зовнішнім чинникам, що впливають на підприємство. Активна співпраця Україні з міжнародними організаціями у сфері морської освіти, зокрема з ІМО, яка може допомогти у розробці спільних програм підготовки кадрів та обміні досвідом.

7. Матеріальне стимулювання персоналу та здійснення моніторингу заробітної плати й інших заохочувальних чинників, що дасть змогу оцінювати сучасний стан проблеми, виявляти причини її виникнення, обґрунтовувати в статистиці та динаміці шляхи адаптації системи матеріального стимулювання.

8. Надання соціального захисту та гарантій співробітникам. Соціально-економічні заходи із соціального захисту, крім матеріального забезпечення та обслуговування, передбачають компенсаційні виплати, відшкодування, поновлення прав та інші соціальні гарантії, які можуть визначатися нормами не тільки права соціального забезпечення, а й інших галузей права.

9. Робота зі створення корпоративної соціальної культури на підприємстві, вироблення спільних цінностей, визнаних і схвалюваних співробітниками.

ВИСНОВКИ

Концептуальні засади визначення цілей кадрового потенціалу морської галузі мають на меті створення умов для оптимального формування і розвитку професійних груп, які відповідають сучасним вимогам і стандартам галузі. Основою таких цілей є врахування специфіки морської діяльності, яка включає технічні, інженерні, управлінські та правові аспекти.

Ефективне формування кадрової структури морської галузі повинно включати комплексний підхід, який передбачає інтеграцію сучасних освітніх програм, стажувань, практичних навчань і постійного професійного розвитку.

Методичні підходи також включають регулярну оцінку потреб у професійному розвитку та підготовці кадрів, використання зворотного зв'язку від працівників і роботодавців, а також аналіз даних щодо рівня виконання планів і показників ефективності.

Загалом, для забезпечення ефективного використання кадрового потенціалу морської галузі необхідна інтеграція сучасних методів оцінки, що дозволяє оперативно реагувати на зміни, підвищувати рівень підготовки кадрів і створювати умови для їхнього професійного зростання. Це сприяє створенню конкурентоспроможної та інноваційної середовища, де людський капітал є основним фактором розвитку та стабільності галузі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Управління персоналом: підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. за заг. ред. О. М. Шубалого. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 414 с.
2. Осовська Г.В. Управління людськими ресурсами. Київ, Кондор, 2008, 224 с.
3. Балабанова Л. В., Сардак О. В. Управління персоналом: Підручник. Київ: Центр учбової літератури, 2019. 468 с.

4. Гурченков О. П. Критерії та показники для оцінки ефективності системи управління персоналом на підприємствах ЖКГ. Вісник університету "Україна". Серія: Економіка, менеджмент, маркетинг. 2019. № 3. С. 103-110.
5. Донець Л. Застосування зарубіжного досвіду стратегічного менеджменту управління персоналом вітчизняними підприємствами. Центральньо-український науковий вісник. Економічні науки. 2020. Вип. 4. С. 119-129.
6. Погорелова Т.О. Сутність економічної категорії «управління персоналом» в умовах економічної трансформації. Ефективна економіка. 2020. № 5. С.26-32.
7. Позднякова Л.О. Управління персоналом: навчальний посібник. УкрДУЗТ, 2019, 226 с.
8. Никифорова В.Г. Управління персоналом підприємства як напрям підвищення прибутку. Інфраструктура ринку. 2020. Вип. 40. С. 324-327.
9. Криворучко О. М. Управління персоналом підприємства. Навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2016. 200 с.
10. Стеценко Н. А. Особливості управління персоналом підприємств на засадах діджиталізації. Економіка. Фінанси. Право. 2021. № 3. С. 20-24.
11. Review of Maritime Transport 2024 Report by the UNCTAD secretariat. – United Nations, New York. URL: https://stats.unctad.org/portcalls_detail_a (дата звернення 05.12.2024).
12. 10 найбільших судноплавних компаній світу у 2025 році. URL: <https://hongoocean.com>. (дата звернення 05.02.2025).
13. Волошинов С. А. Методологічні основи формування професійної компетентності майбутніх морських фахівців. Вісник КрНУ імені М. Остроградського. – 2019. – № 5(118). – С. 25-32.
14. Міжнародна морська організація (ІМО): офіційний сайт. URL: <https://www.imo.org> (дата звернення: 09.01.2025).
15. Консалтингове агентство Drewry: офіційний сайт. URL: www.drewry.co.uk (дата звернення: 09.02.2025).
16. Лебедєва І. Ю., Томашевська В. О. Підходи до оцінки персоналу як складової аналізу кадрового потенціалу та технології його розвитку. Економічна наука: Научно-практичний журнал. 2018. №12. С. 77-79.Табл.1
17. Global Maritime Issues Monitor 2022. URL: <https://www.maritimeissues.org/#overview> (дата звернення: 17.01.2025).
18. Maersk URL: <https://www.maersk.com> (дата звернення: 19.02.2025).
19. Carnival Cruise Line URL: <https://www.carnival.com>. (дата звернення: 07.12.2024).
20. Шмалей С. Організаційно-педагогічні напрями модернізації морської освіти (кінець XX – початок XXI століття). Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології. 2018. № 7. С. 262-272.
21. Дороніна О.А. Кадрова політика як інструмент антикризового управління підприємством. Інвестиції: практика та досвід. 2015. № 20. С. 92–95.
22. Transport 2040: Impact of Technology on Seafarers – The Future of Work. World Maritime University, International Transport Workers’ Federation (ITF), London, UK, DOI: <http://dx.doi.org/10.21677/230613> (дата звернення: 28.01.2025).
23. Крисюк Л. Оцінка конкурентоспроможності ринку круїзних послуг в умовах нестабільності. Економічний аналіз. 2022 рік. Том 32. № 4, С. 29.
24. Бреус С. В. Основні напрями підвищення ефективності процесу управління персоналом організації. Економіка та управління підприємствами. Вип. 25. 2018. С.183-187. URL: <https://stud.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/12464/1/> (дата звернення: 23.01.2025).

REFERENCES

1. Personnel management: a textbook. 2nd edition, revised and supplemented by O. M. Shubalyi. Lutsk: LNTU, 2023. 414 с.
2. Osovska G.V. Human Resource Management. Kyiv: Condor, 2008, 224 p.
3. Balabanova L.V., Sardak O.V. Personnel management: Textbook. Kyiv: Centre for Educational Literature, 2019. 468 с.

4. Criteria and indicators for assessing the effectiveness of the personnel management system in housing and communal services enterprises. Bulletin of the University 'Ukraine'. Series: Economics, management, marketing. 2019. № 3. С. 103-110.
5. Application of foreign experience of strategic management of personnel management by domestic enterprises. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Economic Sciences. 2020. Issue 4. С. 119-129.
6. The essence of the economic category 'personnel management' in the context of economic transformation. Effective Economy. 2020. № 5. С.26-32.
7. Pozdnyakova L.O. Personnel management: a textbook. UkrDUZT, 2019, 226 p.
8. Nikiforenko V.G. Enterprise personnel management as a direction of profit increase. Market infrastructure. 2020. Issue 40. С. 324-327.
9. Enterprise personnel management. Study guide. Kharkiv: KHNADU, 2016. 200 c.
10. Stetsenko N. A. Features of personnel management of enterprises on the basis of digitalisation. Economics. Finance. Law. 2021. № 3. С. 20-24.
11. Review of Maritime Transport 2024 Report by the UNCTAD secretariat. URL: https://stats.unctad.org/portcalls_detail_a (accessed 05.12.2024).
12. largest shipping companies in the world in 2025. URL: <https://hongocean.com> (accessed 05.02.2025).
13. Voloshinov S.A. Methodological bases of formation of professional competence of future maritime specialists. Bulletin of the KrNU named after M. Ostrohradskyi. – 2019. – No. 5(118). – P. 25-32.
14. International Maritime Organization (IMO): official website. URL: <https://www.imo.org> (accessed 09.01.2025).
15. Drewry Consulting Agency: official website. URL: www.drewry.co.uk (accessed 09.02.2025).
16. Lebedieva I., Tomashevskaya V. Approaches to personnel assessment as a component of the analysis of human resources and technology of its development. Economic science: Scientific and Practical Journal. 2018. №12. P. 77-79.
17. Global Maritime Issues Monitor 2022. URL: <https://www.maritimeissues.org/#overview> (accessed 17.01.2025).
18. Maersk URL: <https://www.maersk.com> (accessed 19.02.2025).
19. Carnival Cruise Line URL: <https://www.carnival.com> (accessed 07.12.2024).
20. Shmaleyi S. V. Organisational and pedagogical directions of modernisation of maritime education (late XX – early XXI century). Pedagogical sciences: theory, history, innovative technologies. 2018. № 7. С. 262-272.
21. Doronina O.A. Personnel policy as an instrument of anti-crisis management of the enterprise. Investments: practice and experience. 2015. № 20. С.
22. Transport 2040: Impact of Technology on Seafarers – The Future of Work. World Maritime University, International Transport Workers' Federation (ITF), London, UK, DOI: <http://dx.doi.org/10.21677/230613> (accessed 28.01.2025).
23. Krisjuk L.O. Assessment of the competitiveness of the crewing services market in conditions of instability. Economic analysis. 2022. Vol. 32. № 4, С. 29.
24. Breus S. V. The main directions of increasing the efficiency of the organisation's personnel management process. Economics and management of enterprises. Issue 25. 2018. С.183-187. URL: <https://stud.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/12464/1/> (accessed 23.01.2025).

РЕФЕРАТ

Голубкова І.А. Кадровий потенціал морської галузі: виклики та перспективи розвитку / І.А. Голубкова // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Економічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип.1 (60).

Мета дослідження полягає в аналізі та вдосконаленні системи розвитку кадрового потенціалу як основного елементу підвищення конкурентного потенціалу підприємств морської галузі в умовах нестабільного середовища. У статті розглянуто основні вимоги, які сприяють підвищенню кадрового потенціалу морської галузі як важливого стратегічного завдання. Це не тільки покращить ефективність функціонування підприємств на внутрішньому та зовнішньому ринках, але й сприятиме забезпеченню розвитку висококваліфікованих фахівців, здатних адаптуватися до вимог сучасної морської індустрії та впроваджувати інноваційні технології. Правильно обраний підхід до розвитку

кадрового потенціалу дозволить підприємствам залучати компетентних, талановитих працівників та розкривати їх творчий потенціал; створювати умови для постійного розвитку персоналу та можливості саморозвитку особистості. Саме від професійності кадрового персоналу, його рівня компетентності залежить успішність, прибутковість, конкурентний потенціал морської галузі. Результати дослідження. Кадровий потенціал у морській галузі складається з багатьох взаємопов'язаних елементів, які забезпечують її ефективне функціонування та розвиток. Тому ідентифіковано основні складові кадрового потенціалу: професійні знання та навички, мотивація та психологічні характеристики, освітній рівень, адаптивність та інноваційність, кваліфікація та сертифікація, досвід роботи, комунікативні навички. Морська галузь вимагає спеціалізованих знань і навичок, що включають теоретичну базу, практичний досвід і обов'язкове володіння міжнародними стандартами, такими як SOLAS, MARPOL та STCW. Ці знання забезпечують здатність персоналу виконувати свої функції відповідно до міжнародних вимог. Розуміння основних аспектів кваліфікації та сертифікації, визначених міжнародними нормами, дозволяє чітко встановити вимоги до підготовки фахівців, забезпечуючи високий рівень безпеки та ефективності морських перевезень. Формування бази висококваліфікованих кадрів є складним, трудомістким процесом, який вимагає часу, розробленої системи дій і володіння знаннями морської галузі. Ефективне формування кадрової структури морської галузі повинно включати комплексний підхід, який передбачає інтеграцію сучасних освітніх програм, стажувань, практичних навчань і постійного професійного розвитку. Методичні підходи також включають регулярну оцінку потреб у професійному розвитку та підготовці кадрів, використання зворотного зв'язку від працівників і роботодавців, а також аналіз даних щодо рівня виконання планів і показників ефективності. Щоб сприяти найму та утриманню моряків, важливо забезпечити повну дотримання їхніх прав, закріплених у Конвенції про працю в морському судноплаванні, і допомогти їм підготуватися до поточних і майбутніх технологічних розробок. Тому лідери ІМО вітають роботу, яка проводиться в рамках проекту Transport 2040 за підтримки ІТФ.Висновки. Вирішення завдань розвитку кадрового потенціалу морської галузі для забезпечення ефективного використання трудових ресурсів морегосподарського комплексу необхідна інтеграція сучасних методів оцінки, що дозволяє оперативно реагувати на зміни, підвищувати рівень підготовки кадрів і створювати умови для їхнього професійного зростання. Це сприяє створенню конкурентоспроможної та інноваційної середовища, де людський капітал є основним фактором розвитку та стабільності галузі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КАДРОВИЙ ПОТЕНЦІАЛ, КОНКУРЕНТНИЙ ПОТЕНЦІАЛ, РОЗВИТОК, УПРАВЛІННЯ, МОРСЬКА ГАЛУЗЬ, ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД, МІЖНАРОДНІ СТАНДАРТИ.

ABSTRACT

Golubkova I.A. Human resource potential of the maritime industry: challenges and development prospects. Visnyk National Transport University. Series «Economic sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The purpose of the study is to analyse and improve the system of human resource development as a key element in increasing the competitive potential of maritime enterprises in an unstable environment. The article considers the main requirements that contribute to increasing the human resource potential of the maritime industry as an important strategic task. This will not only improve the efficiency of the functioning of enterprises in the domestic and foreign markets, but will also contribute to ensuring the development of highly qualified specialists who are able to adapt to the requirements of the modern maritime industry and implement innovative technologies. A correctly chosen approach to the development of human resource potential will allow enterprises to attract competent, talented employees and reveal their creative potential; create conditions for continuous staff development and the possibility of personal self-development. It is on the professionalism of personnel and their level of competence that the success, profitability, and competitive potential of the maritime industry depend. Research results. Human resources in the maritime industry consist of many interrelated elements that ensure its effective functioning and development. Therefore, the main components of human resources have been identified: professional knowledge and skills, motivation and psychological characteristics, educational level, adaptability and innovation, qualification and certification, work experience, and communication skills. The maritime industry requires specialized knowledge and skills, including a theoretical base, practical experience, and mandatory knowledge of international standards, such as SOLAS, MARPOL, and STCW. This knowledge ensures the ability of

personnel to perform their functions in accordance with international requirements. Understanding the main aspects of qualification and certification defined by international standards allows us to clearly establish the requirements for training specialists, ensuring a high level of safety and efficiency of maritime transportation. The formation of a base of highly qualified personnel is a complex, labour-intensive process that requires time, a developed system of actions and knowledge of the maritime industry. Effective formation of the personnel structure of the maritime industry should include a comprehensive approach that involves the integration of modern educational programs, internships, practical training and continuous professional development. Methodological approaches also include regular assessment of professional development and training needs, the use of feedback from workers and employers, as well as analysis of data on the level of implementation of plans and performance indicators. To facilitate the recruitment and retention of seafarers, it is important to ensure full respect for their rights enshrined in the Maritime Labour Convention and to help them prepare for current and future technological developments. Therefore, IMO leaders welcome the work being carried out within the framework of the Transport 2040 project with the support of the ITF. Conclusions. Solving the tasks of developing the human resource potential of the maritime industry to ensure the effective use of the labour resources of the maritime complex requires the integration of modern assessment methods, which allows for a prompt response to changes, improving the level of training and creating conditions for their professional growth. This contributes to the creation of a competitive and innovative environment, where human capital is the main factor in the development and stability of the industry.

KEYWORDS: HUMAN RESOURCES, COMPETITIVE POTENTIAL, DEVELOPMENT, MANAGEMENT, MARITIME INDUSTRY, PRACTICAL EXPERIENCE, INTERNATIONAL STANDARDS.

АВТОРИ:

Голубкова І.А, доктор економічних наук, професор, Національний університет Одеська морська академія, завідувач кафедри економічної теорії та підприємництва на морському транспорті, Одеса, Україна. e-mail. prof.irinagolubkova@gmail.com, tel.+380503364678 orcid.org/0000-0002-9931-8291

AUTHORS:

Golubkova Doctor of Economics, professor, National University Odessa Maritime Academy, Odessa, Ukraine, Head of the Department of Economic Theory and Entrepreneurship in Maritime Transport prof.irinagolubkova@gmail.com, tel.+380503364678, orcid.org/0000-0002-9931-8291

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Бакуліч О.О. професор, кандидат технічних наук, професор кафедри менеджменту Національний транспортний університет, Київ, Україна.

Головченко О.М. доктор економічних наук, професор, Національний університет Одеська морська академія, професор кафедри економічної теорії та підприємництва на морському транспорті, Одеса, Україна

REVIEWER:

Bakulich O.O., Professor, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine.

Holovchenko O.M., Doctor of Economic Sciences, Professor, National University Odessa Maritime Academy, Professor of the Department of Economic Theory and Entrepreneurship in Maritime Transport, Odessa, Ukraine.

УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ЯК КЛЮЧОВИЙ ЕЛЕМЕНТ АНТИКРИЗОВОГО СТРАТЕГІЧНОГО ПЛАНУВАННЯ БІЗНЕСУ ТА ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ ВІЙНИ

Литвишко Л.О., кандидат економічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, l.lytvyshko@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0001-9315-046X

Тетірко В.О., Національний транспортний університет, Київ, Україна, vikatetirko@gmail.com, orcid.org/0009-0004-8332-1295

Заїка Ю.Л., Національний транспортний університет, Київ, Україна, uzaika28@gmail.com, orcid.org/0009-0001-5101-1119

Луговцов А.С., Національний транспортний університет, Київ, Україна, lugovcovanton9@gmail.com, orcid.org/0009-0004-1342-706X

RISK MANAGEMENT AS A KEY ELEMENT OF ANTI-CRISIS STRATEGIC PLANNING OF BUSINESSES AND ENTERPRISES IN WAR CONDITIONS

Lytvyshko L.O., Ph.D, National Transport University, Kyiv, Ukraine, l.lytvyshko@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0001-9315-046X

Tetirko V.O., National Transport University, Kyiv, Ukraine, vikatetirko@gmail.com, orcid.org/0009-0004-8332-1295

Zaika Y.L., National Transport University, Kyiv, Ukraine, uzaika28@gmail.com, orcid.org/0009-0001-5101-1119

Luhovtsov A.S., National Transport University, Kyiv, Ukraine, lugovcovanton9@gmail.com, orcid.org/0009-0004-1342-706X

Постановка проблеми. Антикризове стратегічне управління та бізнес-планування в умовах глибокої невизначеності, спричиненої війною, неможливе без розвинутої системи бізнес-аналітики та ефективного управління ризиками. Класичні моделі планування та оцінки ризиків втратили свою актуальність у зв'язку з кардинальною зміною всіх компонентів мінливого бізнес-середовища. Актуальність дослідження цих механізмів обумовлена гострою потребою українських підприємств і бізнесу не лише у виживанні, але й у підтримці операційної діяльності та розробці основ для майбутнього відновлення. Війна спричинила системну кризу, що характеризується безпрецедентним рівнем ризиків: операційні, фінансові, логістичні та кадрові ризики досягли критичного рівня. Руйнування інфраструктури, порушення ланцюгів поставок, масові міграції населення та зниження купівельної спроможності створили середовище, де традиційні підходи до управління ризиками неефективні. Виникає нагальна потреба в необхідності миттєвої адаптації: передбачення та уникнення настання криз, тому бізнес і підприємства змушені швидко перебудовувати бізнес-моделі, змінювати асортимент, знаходити нових постачальників і канали збуту. Це вимагає гнучкості та швидкості прийняття рішень, що неможливо без оперативної аналітики.

Ключовою проблемою є кардинальна зміна ринкових даних: дані, які були релевантними до повномасштабного вторгнення, втратили свою цінність. Виникає потреба в нових джерелах інформації, методах її збору та аналізу для відображення поточної динаміки попиту, пропозиції та логістичних можливостей. У цьому контексті роль цифрових інструментів бізнес-аналітики стає критичною. Вони дозволяють в режимі, близькому до реального часу, здійснювати моніторинг ключових показників, моделювати сценарії розвитку подій, оцінювати вплив різних факторів і, як наслідок, приймати обґрунтовані управлінські рішення, розробляти антикризові заходи в умовах браку часу та інформації. Таким чином, постає комплексна проблема розробки та впровадження адаптивних систем бізнес-аналітики та управління ризиками, що базуються на сучасних цифрових інструментах, для забезпечення стратегічної гнучкості, операційної стійкості та конкурентної переваги українських підприємств і бізнесу в умовах війни та в період післявоєнного відновлення.

Актуальність дослідження. У статті досліджується управління ризиками як один із ключових елементів антикризового стратегічного планування бізнесу та підприємств в умовах війни. Визначено сутність ризику як ефекту невизначеності на цілі організації, що охоплює як загрози, так і потенційні можливості. Обґрунтовано, що повномасштабна війна в Україні спричинила системну

кризу, яка проявляється у зростанні операційних, фінансових, логістичних і кадрових ризиків, а також у порушенні ланцюгів постачання, руйнуванні інфраструктури та зміні ринкових умов. Акцентовано увагу на тому, що традиційні моделі планування виявилися недостатньо ефективними в умовах глибокої невизначеності, що обумовлює необхідність впровадження адаптивних стратегій управління.

Проаналізовано сучасні підходи до управління ризиками на прикладі провідних українських підприємств, які успішно адаптували бізнес-моделі до воєнних умов. Визначено роль цифрових інструментів бізнес-аналітики у забезпеченні стратегічної гнучкості, оперативного реагування та підтримки безперервності бізнесу. Окреслено пріоритетні антикризові стратегії – диверсифікація постачання, гнучке бюджетування, страхування активів, локалізація виробництва та партнерство з міжнародними організаціями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Повномасштабне вторгнення Російської Федерації в лютому 2022 року стало величезним випробуванням для розвитку українського підприємництва, що призвело до значних втрат і кардинальної зміни умов ведення бізнесу. Проте опанувавши шок і режим виживання, український бізнес продемонстрував неймовірну стійкість. Сьогодні він не лише відновлюється, але й активно адаптується до нових реалій, знаходячи нові точки зростання серед викликів війни.

Розвиток підприємництва в Україні до та під час війни є важливою темою, адже саме підприємства відіграють ключову роль у збереженні економіки, підтримці оборони, створенні робочих місць і майбутньому відновленні країни. Дослідження цих процесів допомагає зрозуміти, як український бізнес змінився, загартувався й став основою післявоєнного розвитку країни.

В науковій літературі автори розглядають види криз та причини настання кризових явищ на підприємствах різних галузей. Можна відзначити роботи в цьому напрямку таких вчених, як: Носань Н. [1], Токмакова І. [2], Обруч Г. [3], Железняк К. [4] та інші. Дослідженню управлінню ризиками в складному динамічному середовищі, присвчені праці науковців: Білоус С. [5], Компанець К. [6], Ложачевська О. [7], Воркут Т. [8] та інші. Таким чином, аналіз сучасних досліджень свідчить про те, що ризики спричиняють кризи на підприємствах різних галузей. Антикризове стратегічне планування бізнесу та цифрова трансформація підприємств, з використанням інструментів бізнес-аналітики й систем управління ризиками в умовах війни, сприяють прийняттю обґрунтованих управлінських рішень з урахуванням динаміки зовнішнього середовища, потенційних загроз, ресурсних обмежень та можливостей для адаптації. Це, своєю чергою, забезпечує підвищення стійкості бізнес-моделей, ефективність операційної діяльності та зміцнення конкурентних позицій підприємств на внутрішньому та міжнародному ринках.

Метою дослідження є аналіз та розробка підходів до антикризового стратегічного управління та бізнес-планування підприємств в умовах війни, з урахуванням цифрової трансформації, бізнес-аналітики та управління ризиками, для забезпечення стратегічної гнучкості, операційної стійкості та конкурентних переваг українських підприємств як під час воєнного періоду, так і у процесі післявоєнного відновлення.

Виклад основного матеріалу дослідження. До 2022 року український бізнес активно інтегрувався у світові ринки, зокрема через експорт продукції. Експортна логістика традиційно спиралася на розгалужену мережу залізничного та автомобільного транспорту, а також на потужності морських портів, розташованих у Чорноморському регіоні. Транспорт відіграв важливу роль у зовнішній торгівлі України. У 2021 році послуги транспорту становили 21,17% від усіх імпорتنих послуг, що підкреслює значення транспортної інфраструктури для економіки країни. Частка транспорту в структурі ВВП України за 2015–2021 роки за даними дослідження [9], у 2021 році транспортний сектор становив 5,4% від валового внутрішнього продукту (ВВП) України, що робило його сьомим за величиною сектором економіки країни. Повномасштабне вторгнення Росії в Україну у лютому 2022 року призвело до значних руйнувань транспортної інфраструктури, зокрема доріг, залізниць, мостів. Це спричинило серйозні проблеми в логістиці, транспортуванні, зокрема в експорті аграрної продукції через порти Чорного та Азовського морів.

Ключовими секторами економіки України до початку повномасштабного вторгнення були [9]: промисловість, сільське господарство та агропромисловий комплекс, енергетика, інформаційні технології та телекомунікації, фінансовий сектор та банківська система, будівництво та нерухомість.

До війни український ІТ-сектор вирізнявся як найбільш динамічний і привабливий для інвестицій напрям, який забезпечував створення висококваліфікованих робочих місць. Цей успіх базувався на розвиненій науково-освітній базі країни, формуючи експортні доходи через ІТ-послуги, аутсорсинг та стартапи (рис. 1).

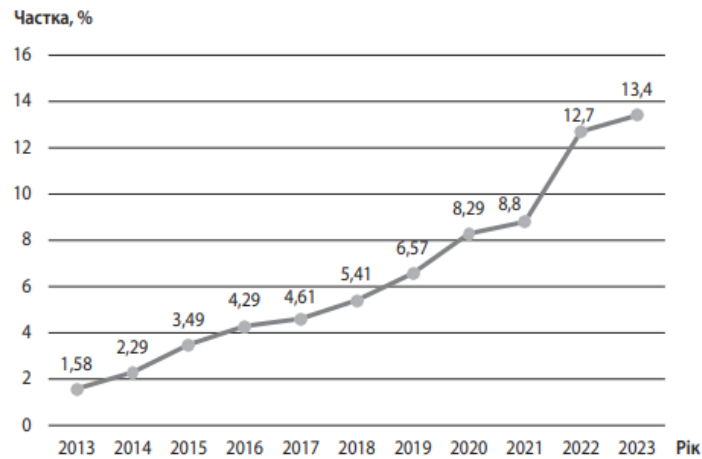


Рисунок 1 – Частка ІТ у структурі загального експорту з України

Джерело: розроблено авторами на підставі [10]

Figure 1 – Share of IT in the structure of total exports from Ukraine

Source: developed by the authors according to [10]

Попри наявні виклики війни, ІТ-сектор України продемонстрував високу адаптивність, ставши однією з основних фінансових складових національної економіки. Станом на кінець 2023 року цей сегмент характеризувався низкою важливих тенденцій і ключових показників [10]:

- частка ІТ послуг становила близько 44% від загального обсягу експорту послуг з України, що відповідає приблизно 7 мільярдам доларів США;

- вперше за тривалий період спостерігалось скорочення річного доходу від експорту ІТ-послуг. Зокрема, річний приріст ІТ-експорту зменшився на 8,5% (з 7,3 мільярда доларів США у 2022 році до 6,7 мільярда доларів США у 2023 році);

- необхідність еміграції та мобілізації спричинила значні кадрові зміни: за кордон виїхало приблизно 57 тисяч ІТ-фахівців (20% від загальної кількості), ще близько 7 тисяч осіб (2,5%) було мобілізовано;

- загальна чисельність ІТ-спеціалістів у галузі становила 309 тисяч осіб. Ці дані свідчать про стійкість і продовження функціонування ІТ-індустрії України навіть за умов складних зовнішніх і внутрішніх викликів.

Станом до 2022 року, активно розвивався ІТ-сектор, деякі українські стартапи ставали відомими у світі. Сфера послуг також зростала, з'являлися нові бізнеси у сфері туризму, логістики, освіти. Підприємства інвестували у модернізацію виробництва, створювали нові продукти, розширювали ринки збуту. Українські товари все частіше потрапляли на полиці європейських супермаркетів. Звичайно, були й проблеми. Корупція та бюрократія заважали розвитку. Високі податки змушували частину бізнесу йти в «тінь». Сильним викликом була міграція кадрів: багато фахівців виїжджали працювати за кордон. Та навіть попри це, український бізнес поступово ставав конкурентоспроможним на міжнародному ринку.

Повномасштабне вторгнення РФ стало величезним випробуванням для українського підприємництва. Перші місяці повномасштабної війни стали для бізнесу періодом жорсткої кризи. За оцінками експертів [11], за дев'ять місяців 2022 року українські великі та середні компанії зазнали загального збитку в 134,7 млрд грн, тоді як за аналогічний період 2021 року вони мали 321,8 млрд грн прибутку. Найбільші збитки зафіксовані у переробній промисловості (82,7 млрд грн) та енергетичному секторі (75,9 млрд грн) (рис. 2).

Економічна активність населення до довоєнного рівня не відновилися, структура ринку робочої сили й досі гірша за показник 2021 року, у переважній більшості ключових галузей економіки кількість працюючих за роки війни зменшилася, витрати роботодавців на оплату праці зростають швидше за інфляцію (рис. 3) [12].

Бізнес зіткнувся з рядом проблем: ракетні атаки призвели до руйнування інфраструктури та виробничих потужностей; логістичні проблеми, зумовлені порушенням ланцюгів поставок та експортних маршрутів; перебої з електропостачанням через обстріли критичної інфраструктури; мобілізація та міграція населення призвели до браку робочої сили тощо.

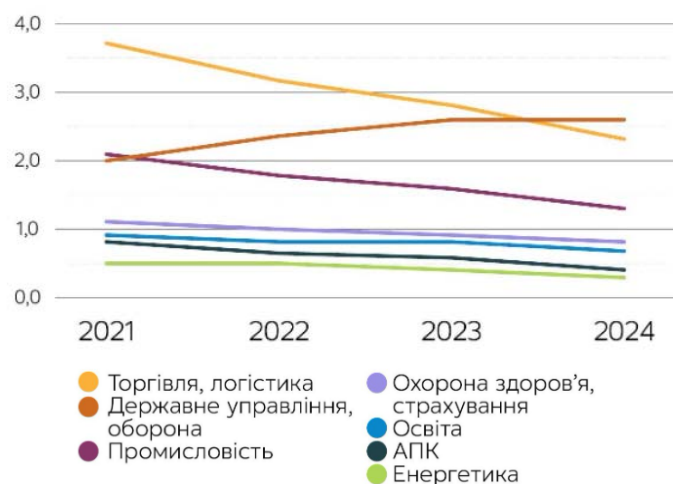
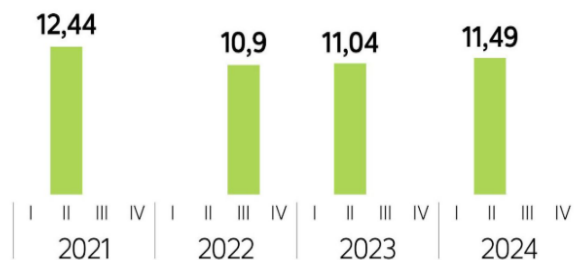


Рисунок 2 – Галузева динаміка зайнятості за 2021-2024 рр., млн. працівників

Джерело: розроблено авторами на підставі [11]

Figure 2 – Sectoral employment dynamics for 2021-2024, million employees

Source: developed by the authors according to [11]



* На приватних підприємствах, у бюджетній сфері, у ФОПів та власне ФОПів

Рисунок 3 – Часткове відновлення кількості працівників в Україні*, млн.осіб

Джерело: розроблено авторами на підставі [12]

Figure 3 – Partial recovery of the number of employees in Ukraine*, million people

Source: developed by the authors according to [12]

Після кризи від вторгнення 64% ММСП (мікро-, малих та середніх підприємств) тимчасово призупинили або згорнули діяльність. Найбільшого удару зазнали виробництво, будівництво (лише 11,5% компаній не зупинилися) та сфера гостинності (громадське харчування, готелі, туризм) [13]. Незважаючи на руйнівний вплив, українські ММСП, які є фундаментом економіки (складаючи 99,98% суб'єктів господарювання та забезпечуючи 74% робочих місць), продемонстрували виняткову стійкість. Проте більшість компаній швидко адаптувалися, і вже у жовтні 2023 року лише 9,6% призупинених компаній мали ризик остаточно припинити роботу [14]. У 2023 році спостерігалось поступове відновлення: загальний прибуток досяг 27% від довоєнного рівня.

Вже з початку 2023 року почала прослідковуватися позитивна динаміка. На початок осені в Україні активно працювали понад 2 мільйони ФОПів. Щомісяця реєструється близько 25 000 нових бізнесів, тоді як закривається близько 17 000 [14]. Ця різниця в 8 000 нових компаній на місяць свідчить про життєздатність та динамізм бізнес-середовища, його здатність до швидкої адаптації.

Підприємці розглядають безпеку як основний фактор і висловлюють намір швидко повернутися на деокуповані території після закінчення війни. Багато підприємств оперативно змінили профіль, перейшовши на виробництво товарів для потреб оборони та населення (військове спорядження, БПЛА, товари тривалого зберігання). На рис. 4 відображена динаміка фінансових результатів великих і середніх компаній України за 2021-2023 роки. У 2022 році через війну – різке падіння, а також часткове відновлення у 2023 році (приблизно до 27% довоєнного рівня).



Рисунок 4 – Динаміка фінансових результатів великих і середніх компаній України у 2021 – 2023 роках (млрд. грн.)

Джерело: розроблено авторами на підставі [15]

Figure 4 – Dynamics of financial results of large and medium-sized Ukrainian companies in 2021–2023 (billion UAH)

Source: developed by the authors based on [15]

Одним із чинників, що здатен впливати на таку динаміку, виступає гостра проблема кадрового забезпечення. У галузях із критичним дефіцитом працівників і необхідністю оперативного заповнення вакансій зберігається високий ризик «тіньового» працевлаштування. Це зумовлено тим, що такий спосіб дає змогу роботодавцям прискорити процес найму, оминаючи тривалі офіційні процедури оформлення [15].

Криза на підприємстві, зумовлена війною, відрізняється від типових кризових ситуацій, з якими бізнес стикається у мирний час, оскільки має затяжний і «хронічний» характер. Додаються прямі фізичні загрози активам, масова внутрішня міграція, мобілізація людських ресурсів і капіталу, руйнування логістичної інфраструктури, нові режими регулювання та суттєвий приріст кіберризиків. У таблиці 1 наведена класифікація ризиків в умовах воєнного часу.

1. Фізичні / інфраструктурні загрози.

Цей тип ризику можливо вважати «класичним воєнним». Будь-яке підприємство може втратити все, якщо об'єкт буде зруйновано – склад, виробництво, центр сортування. Звіти RDNA4 говорять [17], що інфраструктурні збитки всієї країни оцінювалися у кілька десятків мільярдів доларів протягом перших років війни.

Механізм впливу: об'єкт пошкоджено → не працює → замовлення зриваються → клієнти переходять до конкурентів або переходять на інші канали.

2. Ланцюгові / постачальницькі ризики.

Коли кордони закриті або маршрути блоковані, підприємства змушені шукати альтернативу. Але альтернативні маршрути довші, дорожчі, менш надійні. Постачальники також зазнають збитків або дефолту, що веде до каскаду порушень. У рапорті World Bank / KSE чітко вказано [18]: багато компаній переглядали свої канали постачання, переходили на локальних постачальників, змінювали маршрути, перевантажували логістику.

Сценарій: підприємство отримувало деталі з-за кордону → кордони закриті → доводиться купувати за завищеною ціною в менш контрольованих каналах або шукати нових партнерів – за такого сценарію, ризик набагато більший.

Приклад: українські виробники електроніки були змушені переходити до місцевих виробників або шукати альтернативні компоненти через ЄС, що значно здорожчувало виробництво.

Таблиця 1 – Класифікація ризиків в умовах воєнного стану [16]
Table 1 – Classification of risks under martial law [16]

Тип ризику	Опис	Механізм впливу	Приклад
Фізичні / інфраструктурні	Руйнування об'єктів внаслідок обстрілів	Об'єкт пошкоджено → не працює → замовлення зриваються	Інфраструктурні збитки оцінюються у десятки мільярдів доларів
Ланцюгові / постачальні	Блокування маршрутів, дефолти постачальників	Кордони закриті → пошук альтернатив → здорожчання	Виробники електроніки переходять на ЄС-постачальників
Зниження попиту	Падіння платоспроможності, зміна пріоритетів	Зниження доходів → падіння продажів на 50%+ → оптимізація	Перехід споживачів на товари першої необхідності
Фінансовий / ліквідний	Валютні коливання, дефіцит готівки	Падіння виручки + зростання витрат → касовий розрив	Доларові витрати при гривневих доходах
Кадровий	Мобілізація, еміграція, стрес персоналу	Втрата фахівців → зниження продуктивності → реорганізація	ІТ-компанії переходять на повний remote
Репутаційний	Негативна реакція на дії компанії	Підвищення цін / відмова від гуманітарної допомоги → втрата клієнтів	Публічний тиск на великі корпорації
Кібернетичний	Зростання кібератак на критичну інфраструктуру	Зламування систем → втрата даних → збої в роботі	Атаки на логістичні та фінансові системи

3. Ризик зменшення попиту.

Під час війни багато споживачів або переселяються, або втрачають доходи, або змінюють пріоритети (виникає попит на продукти першої необхідності, медичні товари). В таких умовах попит на звичайні споживчі товари може обвалитися. У World Bank / KSE зазначено [18], що «приблизно одна з двох фірм повідомила про більше ніж 50% падіння продажів». Це показник шокового скорочення попиту.

Механізм: падіння платоспроможного попиту → неможливість реалізувати запаси → зниження маржі або збитки → змушена оптимізація витрат.

4. Фінансовий / ліквідний ризик.

Коли витрати «розбігаються» з доходами, компанії можуть опинитися без запасу готівки для операцій. Додайте сюди валютні коливання, інфляцію, неможливість отримати кредит [18]. Приклад: фірма мала контракт із доларовими витратами (імпорт), але виручка була в гривні, курс долара підскочив – це створює великий ризик валютних втрат. За таких умов, багато МСП зверталися до грантів чи кредиторів для подолання касового дефіциту. Механізм: падіння виручки + здорожчання витрат → дефіцит грошового потоку → неможливість оплачувати зарплати чи контракти.

5. Кадрові ризики пов'язані з мобілізацією, виїздом персоналу, відтік спеціалістів. Часто компанії змушені «реконфігурувати» штат, адаптувати графіки роботи, переселяти співробітників.

Цитата з українського дослідження [16]: «Однією з ключових категорій ризику під час війни є кадровий: втрати через мобілізацію, еміграція, зниження продуктивності через стрес, недостаток фахівців».

6. Репутаційні ризики.

Підприємства, особливо великі, знаходяться під пильним оком громадськості та ЗМІ. Якщо вони підвищують ціни, відмовляються від гуманітарних ініціатив або співпрацюють із сумнівними контрагентами – це одразу відгукується у репутації.

7. Кібернетичні / ІТ-інфраструктурні ризики

В умовах війни кібер-атаки зростають, особливо проти логістики, поштових сервісів і фінансових систем. Тому антикризовими заходами є: резервні копії, шифрування, багаторівневий захист, використання захищених каналів зв'язку (наприклад, Starlink).

Ризики не діють ізольовано, вони впливають на всі сфери життєдіяльності соціально-економічної системи. Наприклад, руйнування інфраструктури (фізичний ризик) призводить до логістичних проблем, які посилюють фінансовий тиск та змушують скорочувати персонал, створюючи HR-ризик. Логістичні затримки – це не лише простої, це додаткові витрати й ризики репутації, коли клієнти не отримують доставку вчасно. Тому підходи антикризового менеджменту мають бути комплексними – враховувати крос-ризик, а не точково блокувати один-єдиний ризик [17].

За даними досліджень компанії EY [15], заплановані зміни чисельності співробітників за галузями до кінця 2025 року (II-IV) квартали представлено на рис. 5.



Рисунок 5 – Заплановані зміни чисельності співробітників за галузями до кінця 2025 року (II-IV) квартали, % компаній

Джерело: розроблено авторами на підставі [15]

Figure 5 – Planned changes in the number of employees by industry by the end of 2025 (II-IV quarters), % of companies

Source: developed by the authors based on [15]

Виокремлено ключові елементи механізму антикризового управління, що набувають специфічних рис і модифікують своє функціонування в умовах воєнного стану. Українські підприємці при відновленні бізнесу в умовах війни розробляють антикризові стратегії, спрямовані на забезпечення операційної стійкості, мінімізацію ризиків та зміцнення конкурентоспроможності підприємств. До таких антикризових стратегій адаптації належать:

1. Релокація або локалізація виробництва, адже багато підприємств, особливо із східних і південних регіонів, перемістили свої виробничі потужності у безпечніші центральні та західні області.

2. Перекваліфікація видів діяльності. Компанії змінили профіль продукції на критично важливі в умовах війни товари: від БПЛА та одягу для військових до товарів тривалого зберігання. Яскравими прикладами успішної адаптації стали: PRACTIKA, яка переорієнтувалася на виробництво броньованих автомобілів та спецтехніки для ЗСУ; МІК – найбільше текстильне підприємство України, яке стало ключовим постачальником військової форми для армії.

3. Оптимізація та підтримка бізнесу від держави, зокрема пільговими кредитами та збільшення імпорту для підтримки ліквідності.

4. Диверсифікація та стратегічне планування. Підприємницька діяльність у воєнний період – і водночас, період відбудови – формує нові механізми економічної адаптації. Дослідження показують, що підприємства, які застосовують системну методологію управління ризиками (ідентифікація – оцінка – обробка – моніторинг) і здійснюють бізнес-планування зі сценаріями, то мають набагато вищі шанси на відновлення після кризи.

5. Гнучке бюджетування за сценаріями – використання декількох варіантів фінансових планів, розроблених на основі песимістичних, базових та оптимістичних сценаріїв розвитку подій. Такий

підхід забезпечує оперативне реагування на зміну зовнішніх умов і дає змогу ефективно управляти грошовими потоками.

6. Страхування активів – захист матеріальних і фінансових ресурсів підприємства від непередбачуваних подій, пов'язаних із бойовими діями, пошкодженням інфраструктури, втратою товарно-матеріальних цінностей чи зупинкою виробництва.

7. Резервні маршрути логістики – створення альтернативних транспортних коридорів і логістичних схем з урахуванням військових загроз та обмежень. Такий підхід мінімізує збої в постачанні та сприяє безперебійному виконанню контрактних зобов'язань.

8. Партнерство з волонтерськими та міжнародними організаціями сприяє розширенню кола стейкхолдерів за рахунок гуманітарних і грантових програм. Це дозволяє підприємствам отримати додаткові ресурси, консультаційну підтримку, фінансування та вихід на нові ринки, в тому числі й міжнародні.

9. Інвестиції в технології моніторингу ризиків – впровадження цифрових рішень для аналізу й прогнозування потенційних загроз у реальному часі. Використання систем бізнес-аналітики, штучного інтелекту та великих даних дає змогу приймати обґрунтовані управлінські рішення, зменшувати час реагування на кризові події та запобігати ескалації ризиків.

Ризик у менеджменті визначається як «ефект невизначеності на цілі організації» – це поняття включає як негативні, так і потенційно позитивні наслідки невизначеності. Розглянемо досвід сучасних українських підприємств: логістичне підприємство «Нова Пошта» та мережа супермаркетів «АТБ», які долали виклики та продовжують розвивати бізнес під час повномасштабної війни в Україні.

ТОВ «Нова Пошта» – логістика в умовах війни.

До війни «Нова Пошта» вже була лідером у сфері доставки, відома швидкістю доставки та клієнтоорієнтованістю. Інвестувала у новітні технології та міжнародні напрями. Після початку війни компанія показала приклад справжньої стійкості. Попри обстріли і втрату частини відділень, відновила роботу вже за кілька днів [19]. За словами співзасновника «Nova Post Group» Володимиром Поперюшником: «Компанія отримала великий досвід роботи під час найважчих випробувань в Україні. Змогла використати кожен нову кризу як можливість для зміцнення свого бізнесу. Так було під час кредитної кризи 2008-2009 років, коли ми вийшли сильнішими зі збільшенням продажів на 30%. Те саме можна сказати і про події 2014 року. Після вторгнення Росії та окупації Криму та деяких районів Луганської та Донецької областей компанія втратила свої торговельні точки на цих територіях, а це означало, що наша мережа скоротилася на 20%. І все ж ми розуміли, що просто не маємо права зупинятися. Тому вирішено було відкрити торговельні точки в інших місцях, щоб компенсувати всі втрати. Був розширений новий ринок – у Молдові, запустили міжнародну службу доставки по всьому світу через Nova Post Global, яка охоплює США, Китай, Європу тощо» [19].

Компанія організувала доставку гуманітарних вантажів, допомагала військовим. Інший важливий урок, який був засвоєний після 2014 року – «Нова Пошта» має бути опорою для людей, а бізнес відіграє величезну роль у виживанні країни у скрутний час.

«Нова Пошта» запустила «Гуманітарну пошту України» – проєкт, у рамках якого компанія здійснює доставку від волонтерських організацій військовим та людям, постраждалим від війни. До 24 лютого вони працювали з 85 благодійними організаціями в рамках проєкту, зараз у них їх 1610. Доставили 1161154 посилок для військових від початку 2025 року [19].

Але компанія не тільки займається гуманітарною допомогою, а й почала себе активно розвивати поза межами України, щоб підтримати українців за кордоном.

На запитання «Який вплив мала війна на рішення щодо подальшого розширення за кордон і відкриття торговельних точок у Європі?», співзасновник відповів: «Коли почалася повномасштабна війна, ми поставили собі за мету супроводжувати українців, які переїжджають до Європи, щоб залишатися їхньою опорою навіть за кордоном. Ми вирішили стати головною логістичною ланкою між Україною та країнами ЄС [19].

Протягом перших місяців повномасштабної війни, переміщені українці відчайдушно потребували доставки посилок з особистими речами з України та по Україні. У стані ризику для життя, люди поспішно виїжджали, не встигаючи пакувати речі, залишаючи багато дорогих їм речей.

Nova Post задовольнила цю потребу та запропонувала нову послугу «Посилка з дому» зі знижками до 85% по всій Європі. Послугу було фактично розроблено з нуля [19].

За словами Олександра Бульби – директора компанії [19]: «Вже в жовтні 2022 року ми стали першим українським бізнесом, який розширився на ринок ЄС під час повномасштабного вторгнення. Польща стала першим регіоном, де відкрили наші відділення під брендом Nova Post. Сьогодні відкрито 34 відділення у найбільших містах Польщі, надаються послуги кур'єрської доставки по всій країні та підключені партнерські поштомати до служби доставки».

У березні 2023 року Литва стала другою країною ЄС, де були відкриті відділення Nova Post у Вільнюсі та Каунасі. На сьогодні бізнес розвивається та пропонується кур'єрська доставка до Чехії, Румунії, Німеччини, Нідерландів, Латвії, Естонії, Угорщини, Італії, Австрії, Франції, Іспанії, Великої Британії [19].

З наведеного прикладу, бачимо, що навіть у часи кризи, бізнес може не лише виживати, а й розвиватись на міжнародному ринку, приймаючи стратегічні рішення з антикризового менеджменту та залишатись корисним для суспільства, як це зробила «Нова Пошта».

Ще одним успішним прикладом розвитку бізнесу під час війни, є ТОВ «АТБ-маркет» – українська компанія, яка спеціалізується у сфері роздрібної торгівлі. До війни це була найбільша мережа дискаунтерів із потужною логістикою. ТОВ «АТБ» має власний рухомий склад для логістики та дистрибуції. За даними LIGA.net – мережа супермаркетів АТБ залишається найбільшою в Україні, попри кризу, руйнування та втрати на тлі повномасштабної війни. Наразі в усіх регіонах функціонують більше 1220 магазинів. АТБ – лідер із працевлаштування серед недержавних компаній і найбільший роботодавець українського ритейлу, в мережі якого працює 56 000 українців. Компанія входить до десятки найбільших платників податків країни.

Мережа «АТБ» зіткнулась із: порушеннями постачання та логістики (перестановки складів і маршрутів), ризиком руйнування об'єктів і складських господарств, різким коливанням попиту (панічні закупівлі/деякі регіони знижений попит), необхідністю гарантувати доступність продовольства в прифронтових/евакуйованих районах, очікуванням суспільного запиту на підтримку у формі гуманітарних поставок тощо.

Компанією було прийнято ряд оперативних рішень, антикризових заходів і інновацій у подоланні наслідків війни після початку повномасштабного вторгнення:

1. Підтримка логістики у « посиленому режимі»: Компанія переглянула маршрути постачань, оперативно шукала безпечні коридори для доставки продуктів у зони ризику, оптимізувала роботу розподільних центрів.

2. Цінова політика та соціальна стійкість: Введено заборону/мораторій на підвищення роздрібних цін у критичні моменти, обмеження купівлі деяких товарів, щоб знизити ризик.

Таким чином, ефективне управління ризиками в умовах невизначеності стає ключовим інструментом антикризового стратегічного управління, що дозволяє не лише мінімізувати втрати, а й підтримувати розвиток бізнесу навіть у кризових ситуаціях.

Висновки. Дослідження підтвердило, що ефективне управління ризиками є невід'ємною складовою антикризового стратегічного планування бізнесу та підприємств в умовах війни. Ідентифікація ризиків, оцінка їх впливу та розробка сценаріїв реагування дозволяють зменшити негативні наслідки зовнішніх загроз і забезпечити стабільність функціонування організацій. Повномасштабна війна в Україні призвела до системної кризи, яка проявляється у зростанні операційних, фінансових, логістичних і кадрових ризиків, порушенні ланцюгів постачання, руйнуванні інфраструктури та зміні ринкових умов. Традиційні моделі планування виявилися недостатньо ефективними, що обумовлює необхідність впровадження адаптивних і гнучких стратегій управління. Використання сучасних цифрових інструментів бізнес-аналітики забезпечує оперативне реагування, підтримку безперервності бізнесу та стратегічну гнучкість підприємств, що особливо важливо в умовах високої невизначеності. Проведений аналіз показав ефективність пріоритетних антикризових стратегій: диверсифікації постачання, гнучкого бюджетування, страхування активів, локалізації виробництва та партнерства з міжнародними організаціями. Їхнє впровадження дозволяє адаптувати бізнес-моделі до воєнних умов і забезпечити сталий розвиток підприємств.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Носань Н., Борисенко О., Назаренко Т. Антикризове управління та стратегічний розвиток підприємств у період війни. *Електронний журнал «Економіка та суспільство»*. Вип. №68 (2024). DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-18>
2. Токмакова І.В., Чорнобровка І.В., Войтов І.М., Ковалюк А.В. Формування антикризової стратегії розвитку залізничного транспорту. *Вісник Економіки транспорту і промисловості*. Вип. №75 (2021). DOI: 10.18664/btie.75.281345
3. Обруч Г.В., Лісняк К.Ю., Ткачук Є.А. *Журнал «Причорноморські економічні студії»*. Економіка та управління підприємствами. DOI: <https://doi.org/10.32782/bses.77-7>
4. Железняк К.Л., Бондаренко В.А., Височило О.М. Бізнес-планування в стратегічному управлінні: роль інноваційних технологій в дорожньо-транспортному комплексі. *Електронний журнал «Актуальні питання економічних наук»*. Вип. №7 (2025). URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14759869>
5. Білоус С.П., Власенко А.Ю. Управління ризиками на підприємстві. Цифрова економіка та економічна безпека. Вип. №8(08). 2023. С. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.32782/dees>
6. Компанець К., Ільченко В., Ложачевська О. Ризиковий бар'єр в галузі міжнародного бізнесу. *Економіка та суспільство*. Вип. №31(2021). DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-31-51>
7. Ложачевська О.М., Марціпака В.М. Інноваційний розвиток транспортного комплексу в умовах цифрової трансформації. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління*. Вип. №10 (2023). DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-10>
8. Воркут Т.А., Волинець Л.М. Системні аспекти стратегічного управління організаціями логістичних провайдерів у складному динамічному середовищі. *Дороги і мости*. Київ, 2025. Випуск 31. С. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.022>
9. Agnieszka Skowronek-Grądział. Ukraine's transport infrastructure in the face of war – the context of the financial challenges of reconstruction. *Scientific Papers Of Silesian University Of Technology*. №27 (2025). <https://managementpapers.polsl.pl/wp-content/uploads/2025/09/227-Skowronek-Gr%C4%85dzial.pdf>
10. Шевчук І.Б., Шевчук А.В. Структурно-динамічний аналіз ІТ-ринку України: Виклики сьогодення. *Бізнес Інформ* №3 (2024). DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-3-136-145>
11. Дослідження Київської школи економіки. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/ukraine-human-capital-chartbook-yak-lyudskiy-kapital-viznachaye-stsenariyi-rozvitku-ukrayini/>
12. Центр Разумкова: Трудові ресурси для повоєнного відновлення України URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/galuzevi-trendi-rinok-praczi-v-ukrayini-vikliki-dlya-biznesu-v-umovah-demografichnoyi-krizi>
13. Assessment of the Impact of War on Micro, Small and Medium Enterprises in Ukraine. Electronic resource. URL: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-04/undp-ua-smb-2024.pdf>
14. Офіційний сайт Державної служби статистики. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/oper_new.html
15. Сайт ЕУ в Україні. URL: https://www.ey.com/uk_ua/insights/infrastructure
16. Ватченко Б.С., Шапанов Р.С. Антикризове управління підприємством в умовах війни. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/handle/123456789/9860>
17. Risk management ISO 31000. URL: <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100426.pdf>
18. World Bank Group. *Ukraine: Firms through the War*. 2023. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/03/Ukraine.-Firms-through-the-War-Paper-Nov-2023.pdf>
19. Офіційний сайт ТОВ «Нова Пошта». URL: <https://humanitarian.novaposhta.ua/>
20. Офіційний сайт ТОВ «АТБ-маркет». URL: https://www.atb.ua/page/atb_market

REFERENCES

1. Nosan N., Borysenko O., Nazarenko T. Crisis management and strategic development of enterprises during wartime. Electronic journal «Economics and Society.» Issue No. 68 (2024). DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-18>
2. Tokmakova I.V., Chornobrovka I.V., Voitov I.M., Kovalyuk A.V. Formation of an anti-crisis strategy for the development of railway transport. Bulletin of Transport and Industry Economics. Issue No. 75 (2021). DOI: 10.18664/btie.75.281345
3. Obruch G.V., Lisnyak K.Yu., Tkachuk E.A. Journal «Black Sea Economic Studies.» Economics and Enterprise Management. DOI: <https://doi.org/10.32782/bses.77-7>
4. Zheleznyak K.L., Bondarenko V.A., Vysochilo O.M. Business planning in strategic management: the role of innovative technologies in the road transport complex. Electronic journal «Current Issues in Economic Sciences.» Issue No. 7 (2025). URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14759869>
5. Bilous S.P., Vlasenko A.Yu. Risk management in an enterprise. Digital economy and economic security. Issue No. 8(08). 2023. Pp. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.32782/dees>
6. Komanets K., Ilchenko V., Lozhachevska O. Risk barrier in international business. Economy and society. Issue No. 31(2021). DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-31-51>
7. Lozhachevska O.M., Martsipaka V.M. Innovative development of the transport complex in the context of digital transformation. Problems of modern transformations. Series: Economics and Management. Issue No. 10 (2023). DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-10>
8. Vorkut T.A., Volynets L.M. Systemic aspects of strategic management of logistics providers' organizations in a complex dynamic environment. Roads and Bridges. Kyiv, 2025. Issue 31. Pp. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.022>
9. Agnieszka Skowronek-Grądział. Ukraine's transport infrastructure in the face of war – the context of the financial challenges of reconstruction. Scientific Papers Of Silesian University Of Technology. No. 27 (2025). <https://managementpapers.polsl.pl/wp-content/uploads/2025/09/227-Skowronek-Gr%C4%85dzial.pdf>
10. Shevchuk I.B., Shevchuk A.V. Structural and dynamic analysis of the IT market in Ukraine: Current challenges. Business Inform No. 3 (2024). DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-3-136-145>
11. Research by the Kyiv School of Economics. <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/ukraine-human-capital-chartbook-yak-lyudskiy-kapital-viznachaye-stsenariyi-rozvitku-ukrayini/>
12. Razumkov Center: Labor Resources for Ukraine's Post-War Recovery URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/galuzevi-trendi-rinok-praczi-v-ukrayini-vikliki-dlya-biznesu-v-umovah-demografichnoyi-krizi>
13. Assessment of the Impact of War on Micro, Small and Medium Enterprises in Ukraine. Electronic resource. URL: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-04/undp-ua-smb-2024.pdf>
14. Official website of the State Statistics Service. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/oper_new.html
15. EY website in Ukraine. https://www.ey.com/uk_ua/insights/infrastructure
16. Vatchenko B.S., Sharanov R.S. Anti-crisis management of an enterprise in wartime. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/handle/123456789/9860>
17. Risk management ISO 31000. URL: <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100426.pdf>
18. World Bank Group. Ukraine: Firms through the War. 2023. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/03/Ukraine.-Firms-through-the-War-Paper-Nov-2023.pdf>
19. Official website of Nova Poshta URL: <https://humanitarian.novaposhta.ua/>
20. Official website of ATB-Market URL: https://www.atb.ua/page/atb_market

РЕФЕРАТ

Литвишко Л.О. Управління ризиками як ключовий елемент антикризового стратегічного планування бізнесу та підприємств в умовах війни. / Л.О. Литвишко, В.О. Тетірко, Ю.Л. Заїка,

А.С. Луговцов // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Економічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип.1 (60).

У статті досліджується управління ризиками як один із ключових елементів антикризового стратегічного планування бізнесу та підприємств в умовах війни. Визначено сутність ризику як ефекту невизначеності на цілі організації, що охоплює як загрози, так і потенційні можливості. Обґрунтовано, що повномасштабна війна в Україні спричинила системну кризу, яка проявляється у зростанні операційних, фінансових, логістичних і кадрових ризиків, а також у порушенні ланцюгів постачання, руйнуванні інфраструктури та зміні ринкових умов. Акцентовано увагу на тому, що традиційні моделі планування виявилися недостатньо ефективними в умовах глибокої невизначеності, що обумовлює необхідність впровадження адаптивних стратегій управління.

Проаналізовано сучасні підходи до управління ризиками на прикладі провідних українських підприємств, які успішно адаптували бізнес-моделі до воєнних умов. Визначено роль цифрових інструментів бізнес-аналітики у забезпеченні стратегічної гнучкості, оперативного реагування та підтримки безперервності бізнесу. Окреслено пріоритетні антикризові стратегії – диверсифікація постачання, гнучке бюджетування, страхування активів, локалізація виробництва та партнерство з міжнародними організаціями.

Метою дослідження є аналіз та розробка підходів до антикризового стратегічного управління та бізнес-планування підприємств в умовах війни, з урахуванням цифрової трансформації, бізнес-аналітики та управління ризиками, для забезпечення стратегічної гнучкості, операційної стійкості та конкурентних переваг українських підприємств як під час воєнного періоду, так і у процесі післявоєнного відновлення.

Методи дослідження. У процесі дослідження використано системний та міждисциплінарний підхід, що дозволяє комплексно аналізувати вплив ризиків на діяльність підприємств, процеси антикризового стратегічного управління. Використано методи стратегічного аналізу для оцінки впливу зовнішніх факторів на бізнес-середовище в умовах війни, методи ризик-менеджменту для визначення критичних загроз і вразливих точок діяльності підприємств, методи цифрової бізнес-аналітики для оперативного збору, візуалізації та інтерпретації інформації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНТИКРИЗОВЕ УПРАВЛІННЯ, СТРАТЕГІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ, УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ, БІЗНЕС-АНАЛІТИКА, ПІДПРИЄМСТВА, ВІЙНА, АДАПТИВНІ СТРАТЕГІЇ, МІЖНАРОДНИЙ РИНОК, СТІЙКІСТЬ БІЗНЕСУ.

ABSTRACT

Lytvytsko L.O., Tetirko V.O., Zaika Y.L., Luhovtsov A.S. Risk management as a key element of anti-crisis strategic planning for businesses and enterprises in wartime. Visnyk National Transport University. Series «Economic sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article examines risk management as one of the key elements of anti-crisis strategic planning for businesses and enterprises in wartime. The essence of risk is defined as the effect of uncertainty on the goals of an organization, covering both threats and potential opportunities. It is argued that the full-scale war in Ukraine has caused a systemic crisis, manifested in increased operational, financial, logistical, and personnel risks, as well as in the disruption of supply chains, destruction of infrastructure, and changes in market conditions. It is emphasized that traditional planning models have proven to be insufficiently effective in conditions of deep uncertainty, which necessitates the implementation of adaptive management strategies.

Modern approaches to risk management are analyzed using the example of leading Ukrainian enterprises that have successfully adapted their business models to wartime conditions. The role of digital business analytics tools in ensuring strategic flexibility, rapid response, and business continuity is identified. Priority anti-crisis strategies are outlined: supply diversification, flexible budgeting, asset insurance, production localization, and partnerships with international organizations.

The purpose of the study is to analyze and develop approaches to anti-crisis strategic management and business planning of enterprises in wartime, taking into account digital transformation, business analytics, and risk management, to ensure strategic flexibility, operational stability, and competitive advantages of Ukrainian enterprises both during the war and in the process of post-war recovery.

Research methods. The study uses a systematic and interdisciplinary approach, which allows for a comprehensive analysis of the impact of risks on the activities of enterprises and anti-crisis strategic management processes. Strategic analysis methods were used to assess the impact of external factors on the business environment in wartime, risk management methods to identify critical threats and vulnerabilities in the activities of enterprises, and digital business analytics methods for the rapid collection, visualization, and interpretation of information.

KEYWORDS: CRISIS MANAGEMENT, STRATEGIC PLANNING, RISK MANAGEMENT, BUSINESS ANALYTICS, ENTERPRISES, WAR, ADAPTIVE STRATEGIES, INTERNATIONAL MARKET, BUSINESS RESILIENCE.

АВТОРИ:

Литвишко Лілія Олександрівна, кандидат економічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри менеджменту, e-mail: l.lytvyshko@ntu.edu.ua, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0000-0001-9315-046X

Тетірко Вікторія Олександрівна, здобувачка першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, спеціальності 073 «Менеджмент», Національний транспортний університет, Київ, Україна, vikatetirko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8332-1295>

Заїка Юлія Леонідівна, здобувачка першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, спеціальності 073 «Менеджмент», Національний транспортний університет, Київ, Україна, uzaika28@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5101-1119>

Луговцов Антон Сергійович, здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, спеціальності 073 «Менеджмент», Національний транспортний університет, Київ, Україна, lugovcovanton9@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-1342-706X>

AUTHORS:

Liliia Lytvyshko, Ph.D., Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Management, e-mail: l.lytvyshko@ntu.edu.ua, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovycha-Pavlenko Str. 1., <https://orcid.org/0000-0001-9315-046X>

Viktoriia Tetirko, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: vikatetirko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8332-1295>

Yuliia Zaika, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: uzaika28@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5101-1119>

Anton Luhovtsov, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: lugovcovanton9@gmail.com, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovycha-Pavlenko Str. 1., <https://orcid.org/0009-0004-1342-706X>

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Коваленко Н.В. доктор економічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри менеджменту, Київ, Україна.

Бовш Л.А., кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту готельно-ресторанного бізнесу, Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Kovalenko Nataliia V., Doctor of Economics Sciences, professor, National Transport University, , professor of the Department of Management, Kyiv, Ukraine.

Bovsh Lyudmila A., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hotel and Restaurant Business Management, State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine.