



International periodic scientific journal

ONLINE

www.sworldjournal.com

D.A.Tsenov Academy of Economics - Svishtov (Bulgaria)

Indexed in
INDEXCOPERNICUS
(ICV: 73)
GOOGLESCHOLAR

SWorld Journal

Issue №31

Part 1

May 2025

Published by:

SWorld & D.A. Tsenov Academy of Economics, Svishtov, Bulgaria

Editor: Shibaev Alexander Grigoryevich, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician*
Scientific Secretary: Kuprienko Sergiy, *PhD in Technical Sciences*

Editorial board: More than 400 doctors of science. Full list on page:
<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/about/editorialTeam>

Expert-Peer Review Board of the journal: Full list on page:
<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/expertteam>

The International Scientific Periodical Journal "SWorldJournal" has gained considerable recognition among domestic and foreign researchers and scholars. Today, the journal publishes authors from different countries.

Journal Established in 2018. Periodicity of publication: 6 times a year

The journal activity is driven by the following objectives:

- Broadcasting young researchers and scholars outcomes to wide scientific audience
- Fostering knowledge exchange in scientific community
- Promotion of the unification in scientific approach
- Creation of basis for innovation and new scientific approaches as well as discoveries in unknown domains

The journal purposefully acquaints the reader with the original research of authors in various fields of science, the best examples of scientific journalism.

Publications of the journal are intended for a wide readership - all those who love science. The materials published in the journal reflect current problems and affect the interests of the entire public.

Each article in the journal includes general information in English.

The journal is registered in the INDEXCOPERNICUS, GoogleScholar.

DOI: 10.30888/2663-5712.2025-31-01

Published by:
SWorld &
D.A. Tsenov Academy of Economics
Svishtov, Bulgaria
e-mail: editor@sworldjournal.com



UDC 676.84.059

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL EFFORT OF CONNECTING BRIDGE DESTRUCTION DURING PACKAGING MANUFACTURING WITH FLAT DIE-CUTTING PRESSES

Loizyk V.V.

PhD student.

ORCID: 0009-0007-0832-4199

Bryndas A.M.

PhD student.

ORCID: 0009-0004-4575-6749

Ternytskyi S.V.

c.t.s., associate professor

ORCID: 0000-0002-3814-9762

Lviv Polytechnic National University, Ukraine, Lviv, Bandera Street 12, 79013

Abstract. The article considers a pressing problem in the packaging industry related to optimising post-press processing of paperboard blanks, particularly waste removal and cut-outs separation. An analysis of scientific and technical literature was conducted, which revealed a shortage of fundamental research devoted directly to the mechanics of the destruction of connecting bridges, which are used for the transportation of die-cut blanks through the equipment units. The article aims to study the fundamental aspects of the destruction process of technological bridges in paperboard blanks. The main direction of the work is to establish quantitative dependencies between the destruction force of these connecting elements and the technological parameters and mechanical characteristics of paperboard. The results will create a scientific basis for improving technological processes and equipment in paperboard packaging manufacturing.

Keywords: paperboard packaging, die-cutting, connecting bridges, technological destruction effort, internal waste.

Introduction.

In today's dynamic packaging industry, cellulose-based materials such as paper and paperboard are leading. They account for a significant share, approximately one-third, of the total volume of packaging solutions used worldwide. This demand is primarily due to their favourable physical and mechanical characteristics.

The production of paperboard packaging is a multi-stage technological cycle that includes several technological operations [1]. One of this chain's fundamental and critically essential stages is the die-cutting operation. The execution of the die-cutting operation generates a technological problem associated with ensuring the kinematic stability of the paperboard sheet during its further transportation through the equipment sections. This phenomenon is because there is a partial violation of the structural integrity of the source sheet, which can lead to unwanted displacement of individual



elements of the web or the entire workpiece relative to the trajectory of movement. To level this effect and ensure controlled passage of the material through the production line, the technology forms miniature connecting elements during the die-cutting process - the so-called connecting bridges [2].

Statement of the problem.

Modern die-cutting machines (Fig. 1) are complex, technical, multifunctional and highly productive systems that integrate several autonomous technological units in their design.

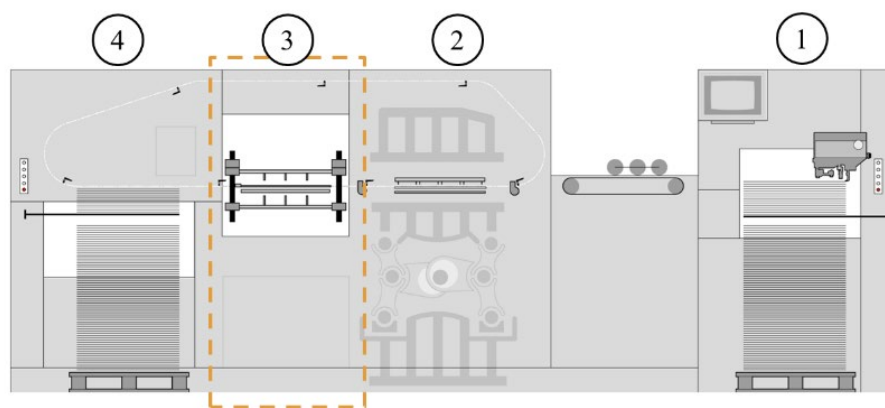


Fig. 1. Scheme of the die-cutting in flat presses

Source: developed by the authors

The paperboard packaging cut-outs manufacturing process uses such equipment as feeding paperboard sheets (position 1) to the working area. Next, in the specialised die-cutting section (position 2), direct contact of the die-cutting form with the paperboard sheet occurs, resulting in the outer and inner contours of the cut-outs. After that, the paperboard sheet, which already contains the cut-outs, technological bleeds of the format sheet and internal waste, is transported to the next section - the waste removal section (position 3). Specialised tools mechanically remove the “extra” elements at this stage, namely the edges and internal trimmings. The final stage of the technological process is the delivery of finished, cleaned waste cut-outs and, if necessary, separated packaging cut-outs (position 4) from the machine for further operations or storage.



Implementing operations for breaking out (removing) technological waste is carried out by controlled destruction of the bridges mentioned above. For this purpose, die-cutting machines use specialised tools and mechanisms to ensure high productivity and efficiency of waste removal and cut-outs separation.

The study [3] shows the analysis of the general loads arising in the die-cutting press and the deformation characteristics of the most flexible elements of its drive mechanism during operating modes. The work [4] is devoted to developing theoretical foundations for calculating the process of cutting out external curved contours in paperboard cut-outs using the scissor-cutting method. The work [5] proposes a methodology and appropriate tools for studying technological efforts directly in the die-cutting operation. The proposed approach allows data on the technologically necessary die-cutting efforts as a function of the movement of the working tool to be obtained. In the scientific work [6], the authors studied the technological efforts of breaking waste from a die-cut paperboard sheet. This study made it possible to obtain data on the effort required to destroy the connecting bridges. The authors consider the obtained experimental and analytical results as a foundation for further research into dynamic loads arising in the components of automatic stamping machines. Considering the analysis of scientific publications, it becomes evident that the primary focus of research is to study the processes of forming webs of paperboard consumer packaging, whether by die-cutting.

Presentation of the primary research material.

Paperboard has a pronounced anisotropy of physical and mechanical properties, which significantly complicates accurately predicting its behaviour and deformation-strength characteristics during mechanical processing, particularly during die-cutting and cut-outs removal operations. This anisotropy results from the predominant orientation of cellulose fibres in the MD during their production. The complexity of paperboard behaviour is due to its unique structure and physical and mechanical characteristics, which combine the attributes of polymeric materials and composite structures. One determining parameter that limits the technological modes and efficiency of post-press processing operations of paperboard blanks, particularly waste



removal, is the force required to destroy the technological connecting bridges. The destruction process of these bridges is characterised by elastic-plastic deflection of the paperboard blank in the zone of localisation of the bridge, which precedes the immediate beginning of its destruction (rupture), as illustrated in Fig. 1). Understanding this stage of deformation is essential for optimising the geometry of the tool and the kinematics of the process of removing scraps.

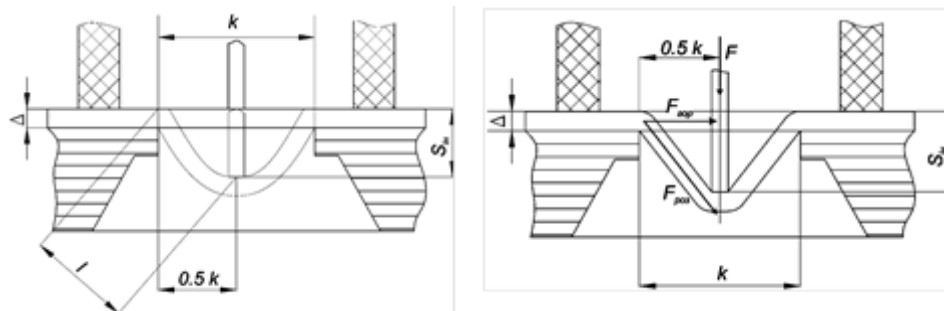


Fig. 2. Interaction between the tool and the paperboard sheet

Source: developed by the authors

The elongation of the paperboard blank can be determined:

$$\Delta l = \sqrt{0,25 \cdot k^2 + S_{in}^2} - 0,5 \cdot k, \quad (1)$$

where k – the width of the gap in the form for cut-out removal; S_{in} – the value of the special tool's vertical movement that is enough to destroy the structure of the paperboard blank.

In turn, the value of the deformation will be:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{0,25 \cdot k^2 + S_{in}^2}}{0,5 \cdot k} - 1. \quad (2)$$

To ensure the destruction of the bridge, it is necessary to evaluate the value of the vertical movement of the special tool:

$$S_{in} = \frac{F_{max} \cdot k^3}{4 \cdot E \cdot a \cdot \Delta^3} = \frac{[\sigma_{p03}] \cdot a \cdot \Delta \cdot k^3}{4 \cdot E \cdot a \cdot \Delta^3} = \frac{[\sigma_{p03}] \cdot k^3}{4 \cdot E \cdot a \cdot \Delta^2}, \quad (3)$$

where F_{max} – the maximum force value required to break the structure of a paperboard blank; Δ – paperboard thickness; E – elasticity modulus; a – connection bridge width.



The special tool will stretch the material in the first stage of the bridge destruction.

To evaluate the value of the force required to ensure such deformation:

$$F_{poz} = F_1 \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

where $\alpha = \arctan \left(\frac{0,5 \cdot k}{S_{in}} \right).$

The value of the paperboard rupture stress:

$$\sigma_{poz} = E \cdot \frac{\Delta l}{0,5 \cdot k}$$

Knowing the value of the maximum tool movement, you can determine the force required to break the bridge::

$$F = E \cdot a \cdot \delta_{\kappa} \left(\frac{\sqrt{0,25 \cdot k^2 + S_{in}}}{0,5 \cdot k} \right) \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{0,5 \cdot k}{S_{in}} \right) \right)$$

For a deeper understanding of the fracture mechanics of paperboard materials, the primary task is to quantify the force required to break interfiber bonds. Achieving this task requires comprehensive experimental studies to identify and formalise the influence of the microstructural parameters of individual cellulose fibres and the macrostructural characteristics of the sheet material as a whole on the complex of its deformation-strength properties.

Summary and conclusion.

Paperboard packaging manufacture inextricably depends on die-cutting and waste removal operations, where technological bridges that require controlled destruction play a key role. Paperboard, a complex anisotropic material, requires an in-depth study of its behaviour during local destruction. Therefore, the primary task is to quantify the force of destruction of bridges through comprehensive experimental studies. The scientific data obtained during the research and the developed models have significant practical value. They allow for targeted optimisation of technological parameters of production processes at all stages of paperboard production. The ultimate goal is to ensure stable packaging manufacture with specified, predicted operational characteristics, allowing stable production of high-quality packaging and increasing the productivity of paperboard packaging manufacture.



References:

1. Emblem A., Emblem H. (2012), Packaging Technology Fundamentals, Materials and Processes, Oxford: Woodhead Publishing, 580p.
2. Regey I., Olishkevych V. (2017). After die-cutting technological operations (removal of waste from die-cut cardboard blanks). Упаковка. № 3. 20–22.
3. Banakh, Y.O. (1998) Експериментальне дослідження процесу штанцювання на пресах тигельного типу з підвищеною точністю базування його робочих органів. Printing and Publishing, 34, 159-163 (in Ukrainian).
4. Rehei, I. I. (2004) Теорія розрахунку засобів і процесу вирізування зовнішніх випуклих криволінійних контурів у розгортках картонного пакування. Technology and Technique of Typography, 2–3(4–5), 39-43.
5. Ternytskyi S.V., Banakh, Y. O., Chekhman, Y. I. (2011) The research method of technological forces at producing involutes of cardboard packing. Scientific Papers, 3(36), 229-235.
6. Ternytskyi S.V., Banakh, Y. O., Chekhman, Y. I. (2017). Removal of waste from die-cut cardboard blanks (experimental evaluation of technological load). Scientific Papers, 2, 47-60.

Анотація. У статті розглядається актуальна проблема пакувальної галузі, пов'язана з оптимізацією процесів післядрукарської обробки картонних заготовок, зокрема, операцій видалення обрізків та розділення розгортки. Проведено аналіз науково-технічної літератури, який виявив дефіцит фундаментальних досліджень, присвячених безпосередньо механіці руйнування цих перемичок. Метою статті є дослідження фундаментальних аспектів процесу руйнування технологічних перемичок у картоні. Основний напрямок роботи полягає у встановленні кількісних залежностей між зусиллям руйнування цих з'єднувальних елементів та визначальними конструктивно-технологічними параметрами і структурно-механічними характеристиками картону. Очікується, що отримані результати створять наукову основу для вдосконалення технологічних процесів та обладнання у виробництві картонного пакування.

Ключові слова: картонне пакування, штанцювання, з'єднувальні перемички, технологічне зусилля руйнування, внутрішні обрізки



УДК 658.5

IMPLEMENTATION OF A TARGETED MODEL OF TESTING ROLLING STOCK COMPONENTS

ВПРОВАДЖЕННЯ ЦІЛЬОВОЇ МОДЕЛІ ВИПРОБУВАНЬ КОМПЛЕКТУЮЧИХ РУХОМОГО СКЛАДУ

Grebeniuk S./ Гребенюк С.П.*Товариство з обмеженою відповідальністю**«Науково виробниче підприємство КАСКАД», Київ, Іоана Павла II, 01042**Limited liability company «Scientific production enterprise CASCADE», Kyiv, John Paul II, 01042***Grebeniuk V./ Гребенюк В.С.***Товариство з обмеженою відповідальністю**«Науково виробниче підприємство КАСКАД», Київ, Іоана Павла II, 01042**Limited liability company «Scientific production enterprise CASCADE», Kyiv, John Paul II, 01042***Liamzyn A./ Лямзін А.О.***State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Liubomyra Huzara, 1, 03058**Державне некомерційне підприємство «Державний університет**«Київський авіаційний інститут», Київ, пр-т. Любомира Гузара, 1, 03058***Ukrainskyi Y./Український Є.О.***State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Liubomyra Huzara, 1, 03058**Державне некомерційне підприємство «Державний університет**«Київський авіаційний інститут», Київ, пр-т. Любомира Гузара, 1, 03058*

Анотація. В роботі розглядається адаптований механізм оцінки працездатності комплектуючих рухомого складу. Означений механізм базується на методі «двох ванн» та спрямований на визначення функціональності комплектуючих з позиції впливу на них чинника термічних навантажень при зберіганні або експлуатації рухомого складу.

Ключові слова: випробування, термічні навантаження, рухомий склад

Вступ.

Проведення термоциклічних випробувань [1], як одного з видів оцінки стійкості радіаторів системи охолодження двигунів внутрішнього згорання та теплообмінників до кліматичного впливу, спрямовано на визначення їх здатності, як виробів з матеріалів (алюміній, мідь, латунь та інші) виготовлених відповідно до РКД, зберігати свої технічні характеристики, під впливом температурних коливань - «термічних ударів (ТУ)».

Реалізація цільової моделі термоциклічних випробувань ТУ спрямована на виявлення прихованих конструктивних дефектів та дефектів у технології, допущених при виготовленні, за допомогою зварювальних робіт або лудіння вище означених виробів.



Структурно логічна схема устаткування для проведення термоциклічних випробувань ТУ наведена на рисунку.

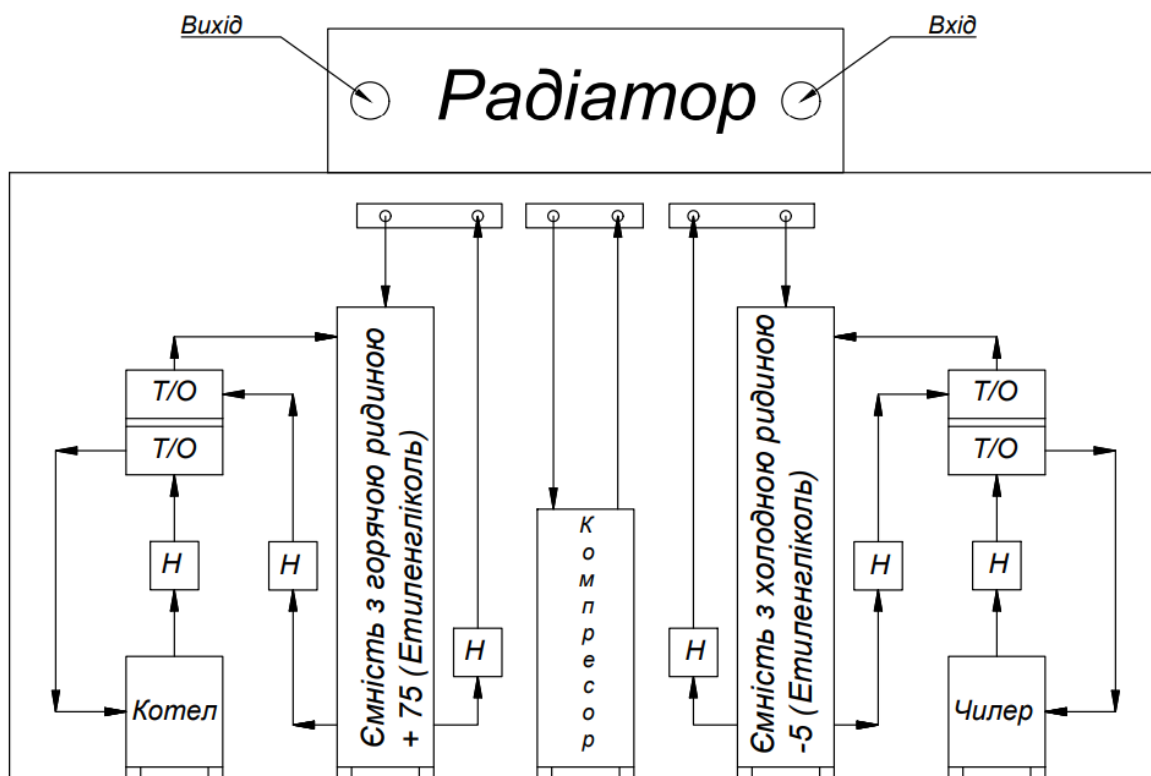


Рисунок 1 – Схема обладнання для проведення випробувань на кліматичний удар

Джерело: Авторська розробка

Основний текст

Базис технологічного процесу проведення вдосконаленого підходу до випробувань ТУ ґрунтується на методі дворідинних ванн [2]. Сама технологія полягає у завданні циклічних ТУ на контрольний виріб для імітації умов його зберігання або експлуатації в точках екстремуму його життєвого циклу, з позиції впливу кліматичного навантаження. Випробування виробу рекомендується розбити на 10 циклів рівних за часовими відрізками.

Кожен цикл складається з наступних етапів, між якими часова затримка залежить від технологічної можливості безперервної подачі у виріб рідини:

- у виріб подається «холодна» рідина;
- у виріб подається «гаряча» рідина.



Тривалість випробування [1] – не менше 100 хвилин.

Речовина – дистильована вода або речовина зі зниженим вмістом солей жорсткості.

Горизонт температурного показника речовини, яка подається у контрольний виріб при випробуваннях КУ, залежить від типу двигуна. Тому, температуру рідини рекомендується витримувати в діапазоні, визначаємих точок екстремумів, для:

- дизельного двигуна – $[5 \div 90] ^\circ\text{C}$;
- бензинового двигуна – $[5 \div 95] ^\circ\text{C}$.

Тиск подачі речовини визначається робочим тиском, з яким подається речовина у виріб згідно з його ТУ.

Порядок та умови проведення термоциклічних випробувань Виробу

1. Термоциклічні випробування Виробу проводять на власному обладнанні або обладнанні сторонніх організацій, що відповідає вимогам проведення випробування. Метрологічне забезпечення випробувального обладнання підтверджується наявністю свідоцтва про підтвердження метрологічних характеристик (калібрування згідно з ДСТУ ISO/IEC17025:2017).

Термоциклічним випробуванням підлягають вироби що пройшли випробування на герметичність на базі виробництва.

2 Перший етап термоциклічних випробувань

2.1 Підлягаючий до випробування Виріб, розміщують у горизонтальному положенні на випробувальному столі приєднують до випробувальної системи та заповнюють охолодженою рідиною при тиску не менше 1 кг/см^2 .

2.2 Після того як Виріб повністю заповнено рідиною тиск у системі підіймається до показника робочого тиску відповідного до НТД на випробувальний Виріб, та контролюють вихід на задану температуру.

2.3 Термоциклічне випробування розпочинають при стабілізації температури на заданому рівні впродовж 5 хв.



2.3.1 При випробуванні контролюють тиск у системі, температуру прокачуємої рідини та наявність протікань по зварним швам та серцевині Виробу.

2.4 По закінченні часу першої етапу випробувань з охолодженою рідиною, Виріб переключають на компресор для зливу охолодженої рідини із системи у проміжну ємність.

3 Другий етап термоциклічних випробувань

3.1 Після повного зливу охолодженої рідини Виріб заповнюється гарячою рідиною, тиск у системі підіймається до показника робочого тиску відповідного до НТД на випробувальний Виріб, та контролюють вихід на задану температуру.

3.2 Термоциклічне випробування розпочинають при стабілізації температури на заданому рівні впродовж 5 хв.

3.2.1 При випробуванні контролюють тиск у системі, температуру прокачуємої рідини та наявність протікань по зварним швам та серцевині Виробу.

3.3 По закінченні часу другого етапу випробувань з гарячою рідиною, Виріб переключають на компресор для зливу гарячої рідини із системи у проміжну ємність.

4. Кількість та час циклів має відповідати вимогам нормативній документації на цей виріб та забезпечувати необхідний термоциклічний удар відповідно до матеріалу Виробу та його системи охолодження. Таблиця 1.

Таблиця 1 – Термоциклічні параметри виробів до систем охолодження транспортних засобів з двигуном внутрішнього згорання

Матеріал Виробу	Система охолодження	Робочий тиск системи кг/см ²	Температура термоциклічного удару °C	Діапазон температур °C *	Час етапу циклу, хв
Мідь латунь	Повітря	1,5	95	-10 ÷ 85	15
	Рідина	1,5			
	Олива	2,0			
Алюміній	Повітря	1,5			
	Рідина	1,5			
	Олива	2,0			



Сталь нержавіюча AISI304	Повітря	1,5			
	Рідина	1,5			
	Олива	2,0			

* **Примітка:** діапазон температур випробувань термоциклічного удару виробу залежить від теплового коефіцієнту лінійного розширення матеріалу зварювання (в даному випадку ПОС-30, ПОС-40 та ПСр-2,5)

5. Виріб вважається таким, що пройшов випробування, якщо після проходження кількості встановлених циклів не виявлено порушень герметичності Виробу.

Висновки.

Було розглянуто порядок та умови проведення випробувань з визначення функціональності комплектуючих на прикладі радіатора охолодження системи охолодження з позиції впливу на них чинника термічних навантажень при зберіганні або експлуатації рухомого складу.

Література:

1. Петерсон, Дж. А., Зіада, І. (ред.). Термоциклування матеріалів. John Wiley & Sons., 2016
2. Випробування радіоелектронних засобів [Текст] / І.Є. Поспєєва, Г.М. Шило, Т.І. Куляба, Харитонova / Навчальний посібник. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2020. – 281 с.

Abstract. The paper considers an adapted mechanism for assessing the performance of rolling stock components. The specified mechanism is based on the “two-bath” method and is aimed at determining the functionality of components from the point of view of the influence of thermal loads on them during storage or operation of rolling stock.

Key words: tests, thermal loads, rolling stock.

Науковий консультант: д.т.н., проф. Щетинін С. В.

Статтю надіслано: 20.05.2025 р.

© Гребенюк С.П., Гребенюк В.С.



УДК 621.65.001.5: 620.197

INCREASING THE POST-REPAIR DURABILITY OF HYDRAULIC PUMPS OF THE NSh-K MODIFICATION BY USING EPILAM COATINGS ON THE WORKING SURFACES OF THE PARTS

ПІДВИЩЕННЯ ПІСЛЯРЕМОНТНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ГІДРАВЛІЧНИХ НАСОСІВ МОДИФІКАЦІЇ НШ-К ЗАСТОСУВАННЯМ ЕПІЛАМНИХ ПОКРИТТІВ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

Melyantsov P.T. / Мельянцов П. Т.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-5937-4021

Dnipro State Agrarian and Economic University,

str. S. Yefremova, 25, 49600

Дніпровський державний аграрно-економічний університет,

вул. С. Єфремова, 25, 49600

Анотація. У роботі розглянуто проблему підвищення післяремонтної довговічності шестеренних насосів модифікації НШ-К, які широко застосовуються в гідравлічних системах мобільної техніки. Показано, що зниження ресурсу після ремонту пов'язане з недосконалістю геометрії зношених деталей та обмеженою ефективністю традиційних технологій відновлення. Обґрунтовано доцільність застосування епіламних покриттів на робочі поверхні деталей качаючого вузла насоса, як засобу покращення антифрикційних та захисних властивостей. Наведено порівняльну характеристику прекурсорів (FDTs, FOTS, «Полізам-05»), здійснено кореляційний аналіз впливу параметрів покриттів на коефіцієнт тертя, зносостійкість, контактний кут змочування та ресурс спряжень. Визначено оптимальний варіант прекурсору для ремонтних умов сервісних підприємств. Отримані результати показали, що у відремонтованих насосів, качаючі вузли яких оброблені епіламом, в процесі обкатки спостерігається стабілізація процесів припрацювання спряжень, що вказує на зростання ресурсу агрегату в умовах експлуатації.

Ключові слова: гідравлічний насос НШ-К, качаючий вузол, ресурсолімітуючі деталі, епіламне покриття, «Полізам-05», ремонтний розмір, коефіцієнт подачі, післяремонтна довговічність.

Вступ.

В мобільних технічних системах для механізації виробничих процесів широко використовуються гідравлічні системи. Одним із ключових агрегатів гідравлічної системи є гідравлічний насос. У передових конструкціях гідравлічних систем широке застосування отримали насоси модифікації НШ-К, у зв'язку з їхньою більшою експлуатаційною довговічністю через наявність у качаючому вузлі (КВ) насоса систем компенсації радіальних та торцевих зазорів [1].



Разом з тим, в ряді робіт [2, 3] автори відмічають, що насоси типу НШ-К є причиною приблизно 22-26% поломок в гідравлічних системах. Усунення таких несправностей призводить до зупинки мобільної техніки, витоків робочої рідини, витрат на придбання нового насоса або його відновлення.

Більш детальний аналіз причин, які обумовили втрату працездатного стану гідравлічних насосів модифікації НШ-К наводиться в роботі [4]. Де автори відмічають, що основними факторами, які спричинили втрату їхньої працездатності, були гідроабразивні пошкодження деталей у з'єднаннях: «платик-замикач – торець зуба шестерні» (торцевий зазор у насосному вузлі) – приблизно 47% відмов; «підтискна обойма – зуб шестерні» (радіальний зазор у насосному вузлі) – 32% відмов; «вкладиш підшипникової обойми – цапфа шестерні», «вкладиш підтискної обойми – цапфа шестерні» – 17% відмов; порушення герметичності сальника ведучої шестерні – 3,5% відмов та інші.

Відновлення працездатності гідравлічних насосів модифікації НШ-К проводиться на спеціалізованих сервісних підприємствах, де у технологічних процесах їх ремонту використовують технології поточного та капітального ремонту, вибір яких залежить від ступеня зносу ресурсолімітуючих деталей качаючого вузла.

Кожна з технологій передбачає застосування механічних операцій для відновлення зношених поверхонь деталей, що підтверджується в роботі [5], де автори відмічають, що в технології поточного ремонту передбачається відновлення робочої поверхні платики-замкача шліфуванням на плоскошліфувальному верстаті з наступним притиранням, а в технології капітального ремонту шестерні обробляють на всіх робочих поверхнях (цапфи шестерні, торцева частина зубців, по діаметру зубців) на круглошліфувальних верстатах до повного усунення зносу з врахуванням ремонтних розмірів.

Додатково варто підкреслити, що термін служби відновлених гідравлічних насосів марки НШ-К в середньому складає лише 50-60% від ресурсу нових аналогів. Це пояснюється наявністю вад у просторовій геометрії корпусних і базових елементів, а також використанням методів відновлення, що не



гарантують потрібної стійкості до зносу під час експлуатації, міцності при втомі деталей та інших факторів [6].

Є явним, що забезпечення міжремонтного ресурсу відремонтованих насосів марки НШ-К буде залежати від довговічності роботи ресурсолімітуючих спряжень їх качаючий вузлів, яка закладається при проведенні ремонтно-відновлювальних операцій, що забезпечують фізико-механічні властивості робочих поверхонь деталей на рівні нових деталей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Забезпечення післяремонтної довговічності гідравлічних шестеренних насосів формується на основі статистичного аналізу наявності дефектів у деталях, характеру та виду зношення їх робочих поверхонь, що суттєво впливають на працездатність агрегату, а також наявності прогресивних способів відновлення, які забезпечують його гарантійний ресурс.

Розгляд факторів, які впливають на підвищення ефективності технологічних процесів з ремонту гідравлічних насосів проводиться в роботі [7]. В якій автори наводять оцінку ремонтної технологічності основних деталей шестеренного насоса НШ-К, яка характеризується пристосованістю їх до відновлення працездатного стану, але при цьому, даються інтегральні рекомендації щодо впровадження технологічних процесів, які розроблюються на основі прогресивних способів відновлення робочих поверхонь деталей, і реалізуються не залежно від характеру та виду їх зношення.

Для збільшення довговічності важко навантажених пар тертя аксіально-поршневих гідромашин сільськогосподарської техніки в роботі [8] автори розглядають можливість застосування епіламних покриттів, яке відноситься до фізико-хімічних методів підвищення зносостійкості деталей обробкою їх твердих поверхонь фторорганічними поверхнево-активними речовинами і вказують на актуальність їх застосування.

В роботі [6] автори рекомендують застосування у технологічному процесі відновлення шестеренних насосів модифікації НШ-К операцій з обробки деталей качаючого вузла епіламними покриттями, основу якого складають



органосиліконові або силоксанові полімери, що формують стійку, гнучку, гідрофобну плівку з високою адгезією до металів, яка зберігає властивості у гідравлічному середовищі, не впливає на розміри спряження і значно зменшує знос у парах тертя.

Застосування даної технології орієнтовано на покращення процесу припрацювання в парах тертя на періоди мікро- і макрогеометричного припрацювання і стабілізації, та відповідно зростання довговічності гідронасосу в умовах експлуатації, яка буде залежати від геометричних розмірів відновлених деталей, які за вибраною технологією можуть відновлюватися до ремонтних розмірів або номінальних.

На сервісних спеціалізованих підприємствах з ремонту гідравлічних насосів модифікації НШ-К широке застосування знайшов спосіб ремонтних розмірів, який детально розглядається в роботі [5], де автори пояснюють його реалізацію за техніко-економічним критерієм, який значно зменшує собівартість ремонту гідроагрегатів.

Звідси забезпечення міжремонтного ресурсу відремонтованих насосів з застосуванням способу ремонтних розмірів в значній мірі буде обумовлюватись якістю проведення механічних операцій направлених на відтворення геометричних розмірів деталей, які залежать від кваліфікації робітників, технічного стану оснастки і обладнання та ін.

Наявні відхилення геометричної форми деталей можуть бути усунені удосконаленими процесами припрацювання деталей за період обкатки та випробовування гідроагрегатів, що відповідно забезпечить зростання ресурсу гідронасосу в умовах експлуатації.

Мета роботи. Підвищення післяремонтної довговічності шестеренних насосів модифікації НШ-К за рахунок покращення антифрикційних та захисних властивостей деталей спряжень качаючих вузлів при застосуванні епіламних покриттів робочих поверхонь деталей в процесі їх ремонту.

Постановка задачі. Поставлена мета досягається вирішенням наступних задач: з врахуванням характеру і виду зношення деталей вибрати ефективний



прекурсор (FDTS, FOTS, «Полізам-05») для нанесення епіламного покриття на деталі качаючого вузла насоса НШ-К; провести кореляційний аналіз параметрів епіламних покриттів (на прикладі FDTS, FOTS, «Полізам-05») для спряжень качаючого вузла гідравлічного насосу типу НШ-К, з урахуванням впливу на функціональні властивості: коефіцієнт тертя, зносостійкість, контактний кут змочування, а також ресурс роботи спряження; розробити технологічний процес обробки деталей епіламом; провести лабораторні випробування з виявлення впливу епіламного покриття на коефіцієнт подачі насоса та час припрацювання спряжень.

Викладення основного матеріалу.

В технологічному процесі з капітального ремонту насосів марки НШ-К першочергово проводяться операції з механічної обробки деталей качаючого вузла гідроагрегату під один із ремонтних розмірів. Якість механічної обробки контролюється геометричними розмірами деталі, в відповідності до ремонтного розміру, і шорсткістю поверхні згідно до технічних вимог.

Враховуючи те, що в технологічному процесі висуваються високі вимоги до точності механічної обробки деталей, покращення антифрикційних та захисних властивостей деталей спряжень качаючих вузлів проводиться на основі застосування епіламних покриттів їх робочих поверхонь в процесі ремонту.

Критерієм для застосування епіламних покриттів типу: FDTS (хімічна основа – перфтордецилтрихлорсилан), FOTS (хімічна основа - перфтороктилтріетоксисилан) та «Полізам-05» (хімічна основа - фторвмісний полімер із силоксановою матрицею), в першу службу показник адгезії до металу, при цьому, нас будуть цікавити матеріали на основі сталі, алюмінію і бронзи, з яких відповідно виготовлено деталі качаючого вузла насоса: ведена та ведучі шестерні, підшипникова та піджимна обойми, платики-замкачі. Вагомим, з точки зору вибору ефективних прекурсорів будуть також: молекулярна стабільність, товщина шару, стійкість у мастилі та ін. Аналітичне порівняння застосування епіламних покриттів деталей у вузлі качаючого насоса наведено в (таблиці 1).



Таблиця 1 - Порівняння прекурсорів для нанесення епіламного покриття на деталі качаючого вузла насоса НШ-К

Параметр	Назва прекурсорів		
	«Полізам-05»	FDTS	FOTS
Стан при нанесенні	Рідина (спрей, занурення)	Газ (вакуумна камера)	Газ або пара
Товщина шару	50–100 нм	1–3 нм	1–3 нм
Кут змочування водою	105–120°	110–115°	105–110°
Стійкість до стирання	Висока (полімерна плівка)	Середня (моношар)	Середня
Температурна стабільність	до 200 °С	до 250 °С	до 200 °С
Технологічність	Просте нанесення, без вакууму	Потрібна вакуумна камера	Потрібна термічна сушка
Вартість	Помірна	Вища (імпортний прекурсор)	Висока
Сумісність з металами	Сталь, алюміній, бронза, титан	Сталь, алюміній, окисдовані сплави	Алюмінієві та бронзові сплави
Стійкість при роботі з мастилами (МГЕ-46, МГЕ-10А)	Дуже висока	Висока	Висока

Авторська розробка

Аналіз показників порівняльної оцінки прекурсорів для нанесення епіламного покриття на деталі качаючого вузла насоса НШ-К, показав, що «Полізам-05» являється оптимальним для зростання міжремонтного ресурсу агрегату, оскільки поєднує високу хімічну стійкість, добру адгезію, термічну стабільність і стійкість при роботі у мастильних середовищах.

Узагальнений кореляційний аналіз впливу типу епіламного покриття на коефіцієнт тертя, зносостійкість та ресурс роботи спряжень (на прикладі типового з'єднання «підшипникова обойми – цапфа шестерні» у маслonaповненому середовищі) представлено в (таблиці 2).



Таблиця 2 - Розраховані коефіцієнти кореляції (R)

Пара параметрів	Коефіцієнт кореляції R	Тип залежності	Інтерпретація
Контактний кут ↔ Коефіцієнт тертя	-0,89	Сильна обернена	Чим вищий кут змочування - тим нижче тертя
Тип покриття ↔ Зносостійкість	+0,76	Помірна пряма	Склад/марка покриття напряму впливає на зносостійкість
Тип покриття ↔ Зміна ресурсу спряження	+0,85	Сильна пряма	Більш досконале покриття - більше продовження ресурсу
Товщина покриття ↔ Зносостійкість	+0,66	Помірна пряма	Товстіше покриття дає більше захисту від зносу
Коефіцієнт тертя ↔ Зміна ресурсу	-0,81	Сильна обернена	Зниження тертя веде до збільшення ресурсу
Контактний кут ↔ Зносостійкість	+0,79	Помірна пряма	Гідрофобність сприяє меншому зносу

Авторська розробка

Застосування епіламних покриттів при ремонті деталей качаючого вузла гідравлічного насоса НШ-К (особливо шестерень, цапф, обойм, пластиків тощо) дозволяє суттєво знизити коефіцієнт тертя, зменшити знос, а також підвищити надійність і довговічність з'єднань, які працюють в умовах граничного або змішаного мащення.

Для розробки технології нанесення епіламних покриттів було відібрано деталі сполучень качаючого вузла насоса: «підшипникова обойма – цапфа шестерні»; «підтискна обойма – цапфа шестерні»; «пластик – торець зуба» (торцевий зазор); «верхівка зуба – підтискна обойма» (радіальний зазор).

За результатами дефектування деталей було визначено фактичні розміри, а через них – ремонтні, для відновлення деталей сполучень качаючого вузла насоса методом ремонтних розмірів. Він передбачає зняття слідів зносу робочих



поверхонь деталей механічною обробкою до ремонтного розміру, з обов'язковим дотриманням технічних вимог щодо класу чистоти поверхні, геометричної форми та фізико-механічних властивостей.

Технологія нанесення епіламного покриття включала в себе підготовку поверхні перед нанесенням покриття: знежирення синтетичним миючим засобом. Механічну обробку до видалення слідів зношення. Ультразвукове очищення: у дистильованій воді або розчині ізопропанолу. Плазмову активацію: обробка в низькотемпературній плазмі (O_2 або Ar) для підвищення адгезії епіламів до металів.

Безпосереднє нанесення епіламних покриттів на поверхню деталі визначалося в залежності від геометрії деталі. Гладкі поверхні валів-шестерень та платиків оброблювались зануренням на 10–15 секунд, а підшипникова і піджимна обойми качаючого вузла аерозольним напиленням (спрей) вручну через точну насадку. Сушка проводилась в термокамері при 80–120 °C протягом 30–60 хв. Контроль якості покриття проводився визначенням кута змочування $> 90^\circ$ (вказує на правильне нанесення епіламу), та оптичний контроль рівномірності ультрафіолетовими індикаторами.

Проведення лабораторних досліджень з отримання функціональної залежності між структурними параметрами технічного стану деталей, оброблених епіламом, та функціональними параметрами при обкатці гідронасоса, проводилося з застосуванням стенда KI-4815M, який призначений для обкатки та випробовування агрегатів гідравлічних систем робочого обладнання мобільних машин. Випробування проводились для насосів марки НШ-50А-2 відремонтованих під другий ремонтний розмір, качаючи вузли яких були оброблені епіламом «Полізам - 05» і без обробки.

Для виявлення функціональної залежності між структурними параметрами технічного стану деталей качаючого вузла насоса, які обумовлюють об'ємні витрати робочої рідини і впливають на об'ємний коефіцієнт подачі насоса, необхідно виявити фактичну подачу насоса, яка визначається



експериментальним шляхом за допомогою станду КІ-4815М за відомими методиками [6].

Тривалість випробувань насосів становила 50...60 годин, адже саме цей період експлуатації визначається припрацюванням взаємодіючих поверхонь та прискореним зношенням деталей в спряженнях. Результати функціональної залежності між коефіцієнтом подачі та часом випробування насосів наведені в (таблиці 3).

Таблиця 3 – Результати експериментальних досліджень зміни коефіцієнта подачі насосів НШ-50А-2

Час обкатки, год.	Робочий об'єм насоса, см ³ .	Робочий тиск, Р _р , Мпа.	Дійсна подача насоса, см ³ /об.	Коефіцієнт подачі насоса
Насос НШ-50А-2 (відновлений під 2-й ремонтний розмір, оброблений епіламом)				
10	50,0	14,0	43,6	0,872
20	50,0	14,0	43,4	0,868
30	50,0	14,0	43,1	0,862
40	50,0	14,0	42,8	0,856
50	50,0	14,0	42,7	0,854
60	50,0	14,0	42,7	0,854
Насос НШ-50-2 (відновлений під 2-й ремонтний розмір, не оброблений епіламом)				
10	50,0	14,0	43,7	0,874
20	50,0	14,0	43,4	0,868
30	50,0	14,0	42,8	0,856
40	50,0	14,0	42,5	0,850
50	50,0	14,0	42,3	0,846
60	50,0	14,0	42,1	0,842

Авторська розробка

Проведений аналіз отриманих результатів наведених в (таблиці 3) показує, що у насосів, деталі качаючих вузлів яких оброблені епіламом, при напрацюванні п'ятдесят годин спостерігається стабілізація подачі насоса (у насоса НШ-50А-2 вона становить 42,7 см³/об).



Наглядно отримані функціональні залежності підтверджується графічно на (рисунку 1).

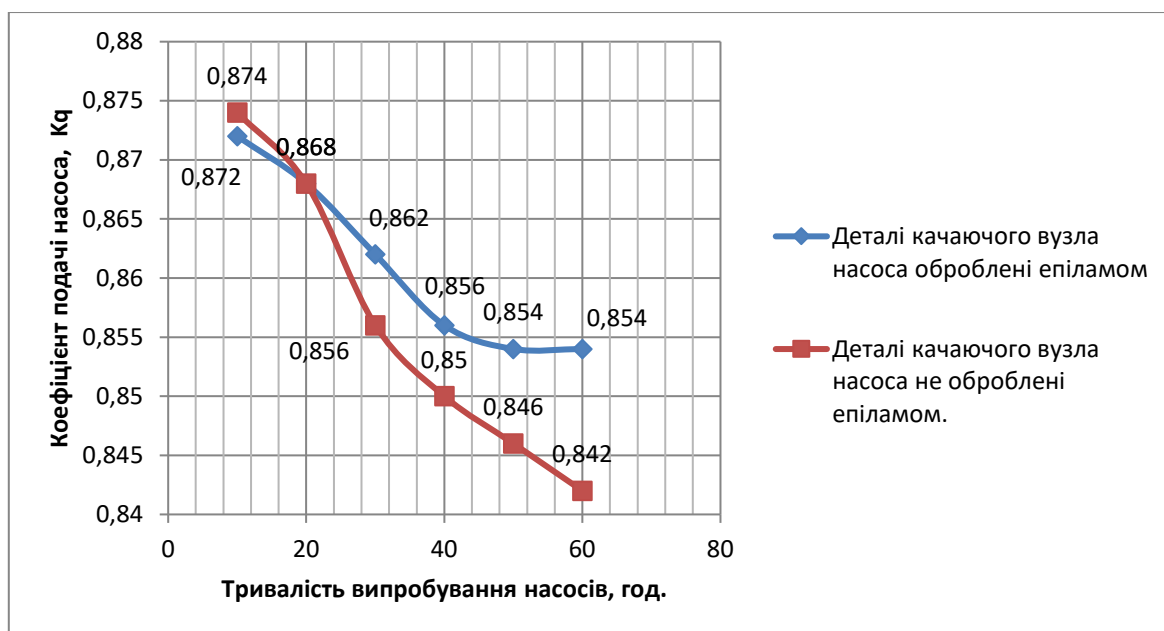


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта подачі (Kq) насоса НШ-50А-2 від часу випробувань

Авторська розробка

Детальніше дослідження графічної складової демонструє, що розбіжність між коефіцієнтами подачі насосів протягом перших двадцяти годин роботи є незначною і зумовлена загальним припрацюванням деталей та формуванням розмірних ланцюгів у з'єднаннях качаючого вузла, що виникає внаслідок стабілізації геометричного положення деталей. Це має аналогічний вплив на насоси, як оброблені так і необроблені епіламом.

Послідуюча різниця коефіцієнтів подачі насосів обумовлюється зміною структурних параметрів технічного стану деталей качаючого вузла, які обумовлені процесом їх припрацювання.

Водночас, у відновлених насосах НШ-50А-2, деталі качаючих вузлів яких оброблені епіламом, після напрацювання шістдесят годин коефіцієнт подачі на 2,3% більший, ніж коефіцієнт подачі у відновлених насосів без обробки епіламом.



Кращі показники коефіцієнта подачі для насосів, що були оброблені епіламом «Полізам-05», пояснюються тим, що на поверхні деталей формується шар орієнтованих молекул, які радикально міняють енергетичні властивості поверхні деталі не змінюючи її структуру, а лише модифікуючи її, надаючи робочим поверхням деталей антифрикційні, антиадгезійні та захисні властивості. При цьому, геометричні розміри оброблюваних деталей залишаються не змінними, так як товщина захисного шару плівки складає приблизно 40-80 Å (10^{-8} м), що не впливає на розмірний ланцюг качаючого вузла насоса.

Висновки.

В цілому отримані результати дослідження дають можливість зробити наступні висновки:

1. Із порівняльної оцінки прекурсорів для нанесення епіламного покриття на деталі качаючого вузла насоса НШ-К, оптимальним являється «Полізам-05», оскільки поєднує високу хімічну стійкість, добру адгезію, термічну стабільність і стійкість при роботі у мастильних середовищах, що вказує на забезпечення зростання міжремонтного ресурсу агрегату.

2. Узагальнений кореляційний аналіз впливу типу епіламного покриття на коефіцієнт тертя, зносостійкість та ресурс роботи спряжень насоса вказує на зниження коефіцієнт тертя, зменшення зносу та підвищення довговічності з'єднань, які працюють в умовах граничного або змішаного мащення.

3. В процесі обкатки відремонтованих шестеренних насосів, у яких деталі качаючих вузлів були оброблені епіламом, при напрацюванні п'ятдесят годин спостерігається стабілізація їх подачі, яка для насоса НШ-50А-2 становить 42,7 см³/об, що пояснюється формуванням на поверхні деталей шару орієнтованих молекул, які радикально міняють енергетичні властивості поверхні, надаючи поверхні антифрикційні, антиадгезійні та захисні властивості, тоді як у насосів, які не оброблювалися епіламом, на протязі всього періоду обкатки подача насоса зменшується і період її стабілізації відсутній.

4. Невелика різниця у коефіцієнтах подачі насосів протягом перших двадцяти годин експлуатації зумовлена загальним припрацюванням деталей та



формуванням розмірних ланцюгів у з'єднаннях насосного вузла. Це відбувається внаслідок стабілізації геометричного положення деталей. Такий процес однаково впливає на насоси, незалежно від застосування епіламів.

5. Застосування у технологічному процесі відновлення шестеренних насосів модифікації НШ-К операцій з обробки деталей качаючого вузла епіламом «Полізам-05», забезпечує збільшення коефіцієнта подачі насоса на 2,3 % в порівнянні з не обробленим насосом, після напрацювання шістдесят годин, і стабілізує процес припрацювання пар тертя, що вказує на збільшення післяремонтного ресурсу насоса в умовах експлуатації.

Література.

1. Мельянцов П. Т., Баранник В. І. Теоретичні дослідження показників довговічності відремонтованих насосів модифікації НШ-К // Zbiór raportów naukowych «Nauka i Utworzenie XXI Stulecia: Teoria, Praktyka, Innowacje», т. 7. – Opole : Diamond Trading Tour, 2013. – S. 54–58

2. Мельянцов П. Т., Падалко С. С. Підвищення експлуатаційної надійності гідравлічної системи підйомних механізмів автомобілів-самоскидів на основі статистичної оцінки надійності насосів // Zbiór artykułów naukowych «Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2015». – Warszawa : Diamond Trading Tour, 2015. – S. 51–54.

3. Мельянцов П. Т., Монтов А. М. Обґрунтування додаткових показників ремонтнопридатності насосів модифікації НШ-К гідравлічної системи трактора // Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej «Inżynieria i technologia. Współczesne problemy i perspektywy rozwoju». – Warszawa : Sp. z o.o. Diamond Trading Tour, 2017. – S. 36–40.

4. Мельянцов П. Т., Русакевич Д. В. Забезпечення ресурсу гідравлічних насосів на основі аналізу типових дефектів та способів їх усунення // Zbiór artykułów Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej "Technics and Technology". – London : Diamond Trading Tour, 2018. – S. 63–68.

5. Мельянцов П. Т., Лосіков О. М., Сидоренко В. К. Вплив технології капітального ремонту гідравлічних насосів модифікації НШ-К на їх



післяремонтну довговічність // Матеріали міжнар. конф. "Організація наукових досліджень в сучасних умовах '2025". – Вип. 30. – 21 березня 2025 р. – Сіетл, США : ProConference спільно з KindleDP, 2025. – С. 9–16. DOI: 10.30888/2709-2267.2025-30-00-019.

6. Мельянцов П. Т., Ісаєнко В. Ю. Підвищення експлуатаційної надійності гідравлічних насосів модифікації НШ-К застосуванням епіламних покриттів робочих поверхонь деталей // Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej "Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2016". – Warszawa : Sp. z o.o. Diamond Trading Tour, 2016. – S. 22–28.

7. Мельянцов П. Т., Соколов С. А. Оцінка ремонтної технологічності деталей шестеренного насоса модифікації НШ-К гідравлічної системи трактора // Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej "Technics and Technology". – London : Diamond Trading Tour, 2020. – S. 42–51.

8. Мельянцов П. Т. Опыт ремонта гидропривода ГСТ-90 на ремонтных предприятиях [Текст] / П. Т. Мельянцов, Б. Г. Харченко, И. Г. Голубев. – М.: Госагропром СССР. АгроНИИТЭИИТО, 1989. – 42 с.

Abstract. The paper considers the problem of increasing the post-repair durability of gear pumps of the NSh-K modification, which are widely used in hydraulic systems of mobile equipment. It is shown that the reduction in service life after repair is associated with the imperfection of the geometry of worn parts and the limited effectiveness of traditional restoration technologies. The feasibility of applying epilam coatings to the working surfaces of parts of the pump pumping unit as a means of improving anti-friction and protective properties is substantiated. A comparative characteristic of precursors (FDTS, FOTS, "Polizam-05") is presented, a correlation analysis of the influence of coating parameters on the friction coefficient, wear resistance, contact wetting angle and service life of the couplings is carried out. The optimal variant of the precursor for repair conditions of service enterprises is determined. The results obtained showed that in repaired pumps, the pumping units of which are treated with epilam, stabilization of the mating running-in processes is observed during the break-in process, which indicates an increase in the unit service life under operating conditions.

Keywords: hydraulic pump NSH-K, pumping unit, resource-limiting parts, epilam coating, "Polizam-05", repair size, feed rate, post-repair durability.

Стаття відправлена: 19.05.2025 р.

© Мельянцов П. Т.



CZU: 332.05

INTERNATIONAL ECONOMIC INTEGRATION AS A FACTOR OF ECONOMIC DEVELOPMENT

Roshka Petru,*Doctor habilitat in economics, professor,**ORCID 0009-0000-5300-7394**Free International University of Moldova,**Chisinau, V. Parcalab, 52, 2012*

Abstract. *Various aspects of the international division of labor are studied in the article; essence, premises and objectives of integration, forms, stages of development and role of this process in the economic growth of the Republic of Moldova. A general characteristic of the main integrationist country groupings (NAFTA, CELAC, MERCOSUR, APEC, G7, G20, BRICS, SCO, CIS, UVEA, GUAM, etc.) is presented; the role of the European Union (EU) as an advantageous form of countries' economic integration; Moldova's relations with the EU; Moldova's cooperation with the main international and regional economic and financial bodies (IMF, IBRD, WTO, EBRD, BERI, etc.), the country participation in the development of regional and cross-border cooperation.*

Keywords. *The essence, forms and stages of economic integration; specialization and international and regional economic cooperation; the EU's role in the global economy; integration of the Republic of Moldova into international and regional economic and financial structures, the impact of this process on the economic growth and development of the country.*

Introduction

International economic integration is a special form of economic relations between different countries of the world, which developed in the twentieth century, after the Second World War. This process can be considered as a qualitatively more advanced method of cooperation, based on the institutionalization of Member States' activities in the field of economic cooperation. This process involves the creation by two or more countries of a common economic space that ensures: *the development of reciprocal exchanges; economic interdependence and the interpenetration of national economies*. The concept of "international economic integration" can be defined as an objective, conscious and consistent process of convergence, mutual adaptation and growth of national economic systems. This process covers several economic categories and is used at both macroeconomic and microeconomic levels, *the purpose of which is to increase the volume of goods and services*. International economic integration is driven by many factors, which are based on: *the creation of conditions that stimulate economic exchanges between countries; modern scientific and technological progress,*



which requires more and more financial resources; the limited capacities of national markets; and increased competition in the world market.

Deepening the International Division of Labor (IDL). An important feature of our time is the strengthening of the interdependence of the economies of different countries, the development of international processes at the macro and micro level, the intensive transition of countries from a closed national economy to a free one open to the whole world. This process is due to the development and deepening of the IDL, which is the main element of world economic integration, being the result of the specialization of the countries of the world in the production and sale of economic goods for exchange on the world market. According to I. Ignat and S. Pralea, the IDL expresses the relations that are established between national economies in terms of the distribution of economic activities among them and shows their place in the world economy [8, p. 48].

Specialization and cooperation as stages of economic integration. International economic specialization is one of the premises and pillars for the formation and development of the world economy. As a result of many centuries of evolution in the world of the IDL system, different types of specialization are distinguished: intrasectoral; intersectoral; intra-company; organological and technological. Each of them takes place in different forms, from one country to another. The need dictated by IDL is also *international industrial cooperation*. Each country develops its own concept of economic growth. Economic cooperation is understood as cooperation in various forms between two or more countries, including: *international trade; cooperation in production (in the form of joint ventures, transnational companies, etc.); international investment; scientific and technical cooperation; energy; tourism; financial relations and external credits; migration of labor resources; international transport; provision of services*, etc. Cooperation and integration into the world economy are intensive ways of development that allow local businesses to gain access to advanced technologies [12, p. 235].

Trends and prospects for the development of the world economy. In the world economy, countries are compared in several areas, the most important of which *is their*



participation in the creation of the world gross product, their share in the world market for goods and services, the world capital market, the level of gross domestic product per capita, etc. according to IMF estimates, it amounted to about **\$174.5 trillion worldwide**. The top **10 countries** by this indicator in 2025 included: the United States (**30.51** trillion); China (US\$19.23 trillion); *Germany* (**4.74** trillion); India (**4.19** trillion); Japan (**4.18** trillion); *Great Britain* (\$3.84 trillion); *France* (**\$3.21** trillion). *Italy* (**2.42** trillion); *Canada* (**\$2.23** trillion) and Brazil (**\$2.12** trillion) (see *Figure 1*).

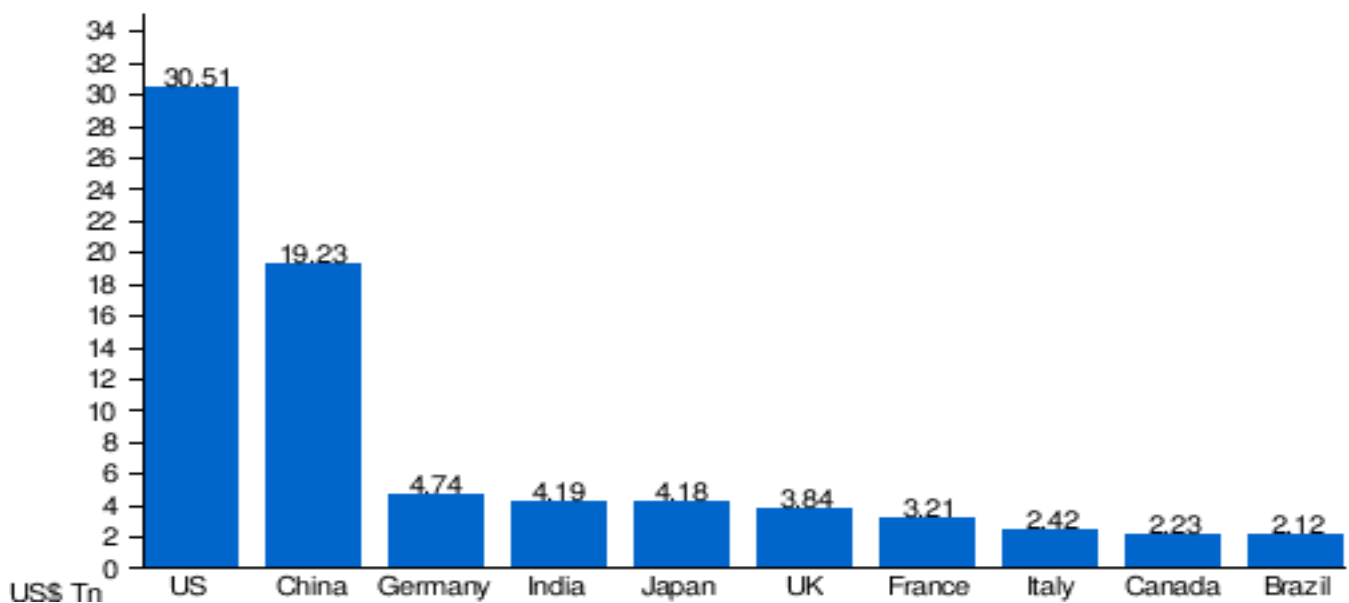


Figure 1. Largest economies in the world by GDP (nominal) in 2025 according to International Monetary Fund estimates^{[1][1]}

According to IMF estimates, the countries with the highest nominal GDP include: the Russian Federation (about 2.1 trillion dollars); Spain (\$1.8 trillion); South Korea (about \$1.8 trillion); Australia (\$1.77 trillion); Mexico (\$1.69 trillion); Tuercia (\$1.44 trillion); Indonesia (about \$1.43 trillion); Niderland (1.27 trillion); Saudi Arabia (1.08 trillion); Poland (\$0.98 trillion); Sweden (0.95 trillion; Taivans (0.80 trillion); Belgium (0.68 trillion); Argentina (trillions); Sweden (0.62 trillion); (Ireland (about 0.60 trillion); Israel (0.58 trillion), Singapore (0.56 trillion); United Arab Emirates (about 0.55 trillion); Tailand (about 0.55 trillion); Austria (\$0.53 trillion); Norway (\$0.50 trillion), etc. [20]. As we can see, the economies of the world are radically different, each state pursues its own policy. From the above, it can be understood that the



economic development of the state depends not so much on the availability of certain resources in the country, but on a truly competent administrative management. As an example, we can cite Japan, a country completely destroyed during World War II, which, without serious resources and even territory, is now one of the world leaders in economic development. It is noted that in the next ten years, China will be ahead of the United States, and the competition between these powerful states will be a great test of strength for the whole world.

Global Problems of the Modern World Economy [11, p. 42-46]. Global problems are serious problems that affect the entire planet or most of it. They do not respect national borders and require international cooperation to solve them. These issues cover a wide range of areas, from the environment to the economy, health and safety at work. **The main global issues** include the following: *environment, demography, peace and disarmament, food, energy and raw materials, human health, use of the oceans, the problem of space exploration, etc.* Each of the global issues has a certain content. But they are all closely related to each other. Recently, the center of gravity of global issues has shifted to the countries ¹ of the developing world. The food problem has become the most catastrophic in these countries. The situation of most developing countries has turned into a serious human and global problem. The main way to solve it is to achieve radical socio-economic transformations in all spheres of life and activity of these countries. in the development of scientific and technological progress, international cooperation.

Foreign debts are also one of the main problems that most countries face, and it has become terrifying. Even the most developed and richest countries have huge foreign debts. Below is a ranking of the countries with the highest sovereign debts (expressed as a percentage of GDP), made by the International Monetary Fund [21]: **Japan** – 262.5% of GDP; **Venezuela** – 240.5%; **Greece** – 199.4%; **Sudan** – 182%; **Eritrea** – 176.3%; **Singapore** – 159.9%; **Italy** – 150.9%; **Cape Verde** – 142.3%; **Barbados** – 135.4%; **Bhutan** – 132.4%; **Bahrain** – 128.5%; **USA** – 128.1%; **Portugal** – 127.4%; **Suriname** – 125.7%; **Maldives** – 124.8% etc. Romania's external debt is



45%, Ukraine's – 81%. China has practically no external debts (13.5%), the same as Russia (13.7%) in terms of GDP [11, p. 46].

The historical period in which we live, influenced by phenomena such as globalization or regionalization, by new means of communication such as the Internet or social relations such as Facebook or Twitter, by political and social changes that have taken place or will take place within states, by mutations or transformations in international organizations, etc., as well as by the interconnections and interdependencies between all of the above, will also cause changes in the world economy [10, p. 11-12]. According to experts in this field, against the background of increasing dependence on certain resources, many of which are limited and close in terms of depletion over time, economic activity will be reoriented to other spheres, such as space, the world, thus entering a new stage - interplanetary. On the other hand, the world economy will face numerous imbalances, crises and a high degree of instability, especially in areas facing political, economic and social problems. According to Matthew Burrows, the world is going through difficult times. He compares today's situation with other turning points in history, such as 1789, 1815, 1919, 1945 or 1989, when political, social and economic systems collapsed. Either we take responsibility and direct the changes in the right direction, or they will fall on us... [2, p. 13]. Global experience provides us with many examples, including that sustainable economic development can be ensured as a result of promoting economic policies based on scientific decision-making. **Deepening the process of economic integration between states.**

In recent decades, the deepening of the process of economic integration between states has played a special role in the development of the world economy. According to I. Ignat and S. Pralea, from an economic point of view, *integration is a process by which two or more national markets of unit size, considered insufficient, previously separated, are combined into a single market (common market) of more efficient dimensions*. In order to achieve this objective with minimal social costs, it is necessary to implement a series of measures to adjust the national structures that integration entails. Usually, this requires a longer transition period [8, p. 223]. V. Bardan notes



that an important reason for integration is the political factor: the desire of states to gain greater authority and political weight in the world community through integration, thus quickly solving their economic problems on this basis [3, p. 15].

At the international level, different types of economic integration have been formulated, which represent certain stages of the economic integration process in its evolution [11, pp. 50-52]: preferential trade agreement; free trade area; customs union; economic cooperation area; common market; economic and monetary union; general economic integration; political and social integration (e.g. European Union). In particular, economic integration between states is regional in nature. *Regionalization* implies that nation-states develop increasingly pronounced interdependent relationships of varying degrees of complexity.

Characteristics of some groupings of countries of international and regional integration [see: 11, pp. 53-66]. Currently, there are more than 20 international integration economic associations in the world, which include the main regions and continents of the globe. The North American Free Trade Agreement (NAFTA), established in 1991 by the United States, Canada and Mexico, covers a market of 375 million consumers and an area of 21.3 million km², with the prospect of expansion in the south of the American continent. The fields of activity are: trade in material goods and services; direct investments – liberalized; Other provisions concern: competition rules, intellectual property, temporary residence of businessmen, certain aspects of environmental protection, etc.

Other groups of countries are also active in the Americas, such as the *Community of Latin American and Caribbean States (CELAC)*, a regional bloc made up of Latin American and Caribbean states, created on February 23, 2010. It includes 33 sovereign states representing about 600 million people. The United States and Canada are not part of the bloc. In South America, there is an international organization **MERCOSUR**, founded in 1991 by Argentina, Brazil, Uruguay, Paraguay and Venezuela. Bolivia, Chile, Columbia, Ecuador and Peru have the status of associate members. The general objectives of MERCOSUR are: *to increase efficiency and productivity by opening markets and accelerating economic development; to improve*



the prospects for more efficient use of available resources; to preserve the environment; to improve communications; to harmonize and coordinate macroeconomic policies and to complement the various sectors.

Cooperation between countries with access to the Pacific Ocean is actively developing. *The Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC)* is a forum of a group of 21 countries, representing about 60% of the global economy, where issues of regional economy, cooperation, trade and investment are discussed. In Central Asia, the Shanghai Cooperation Organization (SCO) is also active, as an international organization established on June 15, 2001 by the leaders of China, Russia, Kazakhstan, Tajikistan, Kyrgyzstan and Uzbekistan, which were later joined by India and Pakistan (in 2017), Iran (in 2022) and Belarus (in 2024). The total territory of the SCO countries is more than 35 million km², which is 65% of the territory of Eurasia, and the total population of these countries is about 3.5 billion people, which is half of the world's population. The main tasks of the SCO are to strengthen stability and security in a broad space uniting Member States, to fight terrorism, separatism, extremism, drug trafficking, and to develop economic, energy, scientific and cultural cooperation [15].

In Africa, there is *the African Economic Community*, which is composed of all African countries and consists of regional blocs, also known as its pillars: *the Economic Community of West African States, the Economic Community of West African States (ECOWAS), the East African Community, the Economic Community of Central African States, the South African Development Community (SADC), and the Intergovernmental Body on Climate Change. development*, an economic bloc encompassing the Horn of Africa; *the Community of Sahel-Saharan States*, one of the largest economic organizations in Africa; the bloc of countries of *Eastern and Southern Africa* (with the acronym COMESA); *The Arab Maghreb Union*, which covers northwest Africa.

A special role in the development of the world economy and international economic relations is played by the group of industrialized countries (**G7**) and the group of developing countries (**G20**) [11, p. 57-59]. **The G7** is an international forum of the governments of economically, technologically and militarily developed



countries: Canada, France, Germany, Italy, Japan, the United Kingdom and the United States of America. Between 1997 and 2014, the G7 was known as **the G8**, consisting of the G7 countries plus Russia. March 2, 2014, due to the invasion of Ukraine, Russia was excluded from this group until it changed course. Since 2014, the G8 group has included seven states and the EU.

The Group of 20 countries (G20 or G20+) is a bloc of developing countries founded on August 20, 2003. The group was formed at the Fifth Ministerial Conference of the World Trade Organization, which took place in Cancún, Mexico, from 10 to 14 September 2003. The G-20 covers 60% of the world's population, 70% of farmers, and 26% of global agricultural exports. Currently, the group includes 23 countries: Argentina, Bolivia, Brazil, Chile, China, Cuba, Ecuador, Egypt, Guatemala, India, Indonesia, Mexico, Nigeria, Pakistan, Paraguay, Peru, Philippines, South Africa, Tanzania, Thailand, Uruguay, Venezuela, Zimbabwe. On September 9-10, 2023 in India, the eighteenth meeting of the heads of state of the Group of Twenty (G20) was held in India, which was not attended by Russian President Vladimir Putin and Chinese President Xi Jinping. During the summit, agreements were reached on climate and biofuels, etc.

The grouping of countries is BRIC [11, pp. 59-64], developing countries: Brazil, Russia, India, and China, which are identified as growing economic powers. Since June 2006, South Africa (**BRICS**) **has been included in this organization**. The following countries are also invited to join this organization: Egypt, Iran, the United Arab Emirates, Saudi Arabia and Ethiopia, then the number of members can increase to ten. Basically, bilateral relations between the BRICS countries are built on the principles of non-interference, equality and mutual benefit. In addition to summits, meetings are held at the level of foreign ministers, finance ministers and others. The economies of these countries are developing at a high pace. The list of countries interested in joining the club is long, over 23 countries, including Saudi Arabia, Indonesia, Iran, Argentina, and Ethiopia, etc.

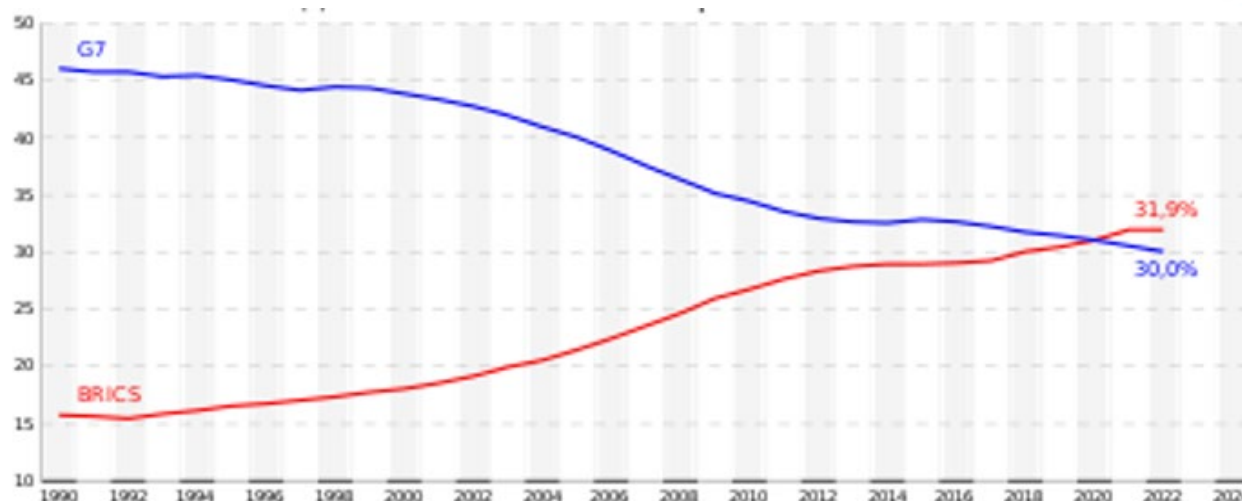


Figure 2. Share of GDP of the G7 and BRICS countries in the world economy [11, p. 60].

The Commonwealth of Independent States was formed on December 8, 1991 following the signing of the Treaty on the Establishment of the Commonwealth of Independent States (CIS) by the Presidents of the Republic of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. On December 21, 1991, in Almaty, the presidents of the republics: Azerbaijan, Armenia, Belarus, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Moldova, the Russian Federation, Tajikistan, Turkmenistan, Uzbekistan and Ukraine, signed **the Declaration on the establishment of the CIS**. *The tasks of the CIS are:* cooperation in the political, economic, environmental, humanitarian, cultural and other fields; comprehensive and balanced economic and social development of member countries within a common economic space, interstate cooperation and integration; ensuring human rights and fundamental freedoms, etc. In the first years after its creation, activities in the CIS were carried out relatively normally, but after Russia's intervention in Georgia in 2008, the creation of the autonomous republics of Abkhazia and South Ossetia, the annexation of Crimea in 2014, the creation of the Donbas and Lugansk republics and their admission to the Russian Federation, Russia's military intervention in Ukraine in February 2022 and other negative moments, the CIS's activities were blocked. largely replaced by *the Eurasian Customs Union*.

The Eurasian Customs Union (EAEU) [11, p. 64-66], consisting of Russia, Kazakhstan, Belarus, etc., within which customs duties on reciprocal trade were eliminated and a single system of taxation of imports was introduced. On January 1,



2010, the Common Tariff entered into force, and on July 1, 2010 – the Customs Code of the Customs Union" and, possibly, the Eurasian Economic Union (EAEU). This is more of a political project than an economic one. The Russian leadership has repeatedly called on its eastern partners to join the customs union at the expense of the Deep and Comprehensive Free Trade Area (DCFTA) with the EU. This "invitation" was accompanied by both positive and negative reasons, such as low energy prices, threats of higher tariffs or trade barriers, etc. Moldova has chosen the path of EU integration, while developing mutually beneficial bilateral relations with any country, including Russia.

It is well known that the Russian Federation is a country rich in natural resources. It ranks first in the world in terms of gas resources (32%), coal and forest resources (23%), iron ore (about 28%), aluminum, nitrogen fertilizers, fish resources, drinking water, salt, and more. At the same time, *Russia ranks 67th in the world in terms of living standards, 70th in terms of the use of advanced information and communication technologies, 72nd in terms of public expenditure per capita, 97th, in terms of per capita income, being in 127th place in terms of public health, 134th in terms of life expectancy of men, 159th in terms of citizens' rights and freedoms, 175th in terms of people's physical safety; it ranks 182nd – in terms of mortality, etc., out of 207 countries analyzed by UNESCO* [11, p.165-166]. These are the results of the policies promoted by the Russian leadership. Everyone should know this in order to draw objective and correct conclusions.

Institutional Foundations of International Economic Integration [11, p. 66-81]. International economic integration is achieved through international institutions and organizations: *financially*, through **the IMF and IBRD**, etc.; *in the commercial sphere*, through **GATT/WTO**. At the same time, we are witnessing the emergence of many other economic integration structures with different objectives, especially at regional level, which play an important role in the development of international economic integration processes.

For example, the main objectives of **the International Monetary Fund (IMF)** are: *to promote international monetary cooperation; to promote the balanced*



development and growth of international trade; to create a multilateral system of settlements between member countries, etc. The World Bank, **an institution made up of five other international financial institutions**, is actively involved in the development of the international economic integration process: the International Bank for Reconstruction and Development (IBRD), the International Finance Corporation (IFC), the International Development Association (IDA); the Multilateral Investment Guarantee Agency (MIGA); International Centre for Settlement of Investment Disputes (ICSID). Each institution has a role to play in combating poverty and improving the living conditions of the population in developing countries. It currently has 190 member countries, including the Republic of Moldova (as of August 12, 1992).

A particularly important role in the development of international economic relations is played by **the World Trade Organization (WTO)**, which oversees a large number of agreements that determine the "rules of trade" between member states. The WTO was established in 1995 as a successor to **the General Agreement on Tariffs and Trade (GATT)** and works to reduce and eliminate international trade barriers, fulfilling two main functions: it is a negotiating forum for discussing new and existing trade rules and as a dispute agreement body. All WTO members are encouraged to grant each other most-favoured-nation status, so (with few exceptions) trade concessions offered by a WTO member to a country should be offered to all WTO members. At the same time, there is also criticism of the WTO for favoring developed countries and transnational companies more, becoming the main target of anti-globalization protests. The WTO should be actively involved in the process of countering the trade "war" in countries, promoted by the current US administration.

Many other international organizations have a positive impact on deepening the process of international economic integration, such as: *the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO); Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); (United Nations Development Programme (UNDP); International Development Association (IDA); United States Agency for International Development (USAID); The International Tourism Organization (IOM), the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), the European*



Bank for Reconstruction and Development (EBRD), the European Investment Bank (EIB) and many other international organizations in various fields of activity.

The role of transnational corporations (TNCs) in the integration process

[11, p. 75-78]. Today, transnational corporations occupy a leading position in the world economy, having a greater power even than some developed countries. 247 Wall St., LLC is ranked among the most profitable companies in the world annually. In 2015, this title was taken over by Apple Inc., which made a profit of 39.5 billion. \$, with a turnover of 182.8 billion.\$., thus surpassing Exxon Mobil, which had a profit of \$33.6 billion. \$ (turnover 369.4 billion.\$). In third place Co.Ltd Samsung Electronics, with a profit of 21.4 billion. \$. It is followed by Berkshire Hathaway Inc. (\$20.2 billion). \$. Chevron Corporation (\$19.3 billion). \$), Toyota Motor Corporation (\$19.2 billion. \$), PetroChina Co. Ltd (19.2 billion. \$), China Mobile Limited (17.6 billion. \$), Wal-Mart Stores Inc. (\$16.8 billion. \$), Jonson & Jonson (\$16.3 billion. \$) [6, pp. 33-34]. Of the 500 largest transnational companies in terms of revenue, 161 are based in the EU.

The European Union is an advanced form of economic integration [11, p. 82-153]. The *EU* is a political and economic union made up of 27 Member States, mainly located in Europe. It has an area of 4,233,262 km² and an estimated population of about 447 million people. The EU has developed a single internal market through a standardised system of laws that apply in all Member States.-the adoption of legislation in the field of justice and home affairs, as well as the maintenance of a common policy in the field of trade, agriculture, fisheries and regional development. Passport control has been eliminated for travel within the Schengen area . The monetary union was created in 1999, entered into force in 2002 and consists of 19 EU Member States that use the euro. In the following years, the Community expanded with the accession of the new Member States, in several stages: in 1973 it was joined: Denmark, Ireland and the United Kingdom, in 1981 – Greece, in 1986 – Portugal and Spain, in 1995 – Austria, Sweden and Finland, in 2004 it was joined: Hungary, Poland, Czech Republic, Slovakia, Slovenia, Estonia, Lithuania, Cyprus, Malta, in 2007 – Romania and



Bulgaria, in 2013 – Croatia. In January 2020, the United Kingdom left the Union following a referendum in June 2016. The **EU currently** includes 27 countries.

Many countries have expressed their desire to join the EU (Turkey, Macedonia, Serbia, Albania, Bosnia and Herzegovina). **On** 15 December 2023, the EU decided to start accession negotiations between Ukraine and Moldova, and Georgia was granted the status of a candidate country for EU membership. Thus, the process of EU enlargement is developing. There are four countries that are members of the European Free Trade Association (EFTA) but are not members of the EU but are partially engaged in EU economic policy and regulation: Iceland, Liechtenstein, Norway and Switzerland. The EU also maintains relations with the European microstates of Andorra, Monaco, San Marino and the Vatican, which use a single currency and cooperate in some areas.

Accession criteria. The following convergence criteria have been established for countries using the single currency, the euro, and for candidate countries for its implementation: the inflation rate must not exceed 1.5% of the average recorded in the top 3 countries with the best indicators; the long-term interest rate must not exceed by more than 2% the level of the first three with the lowest inflation; the budget deficit should not exceed 3% of GDP; external debt should not exceed 60% of GDP. For countries joining the EU (such as Ukraine, the Republic of Moldova, etc.), the following conditions are set: stability of democratic institutions and the rule of law, respect for human rights, including the rights of ethnic minorities; existence and functioning of a market economy; ability to cope with pressures market forces within the Union; the ability to assume the obligations imposed on the EU member; including commitment to the objectives of the political, economic, monetary and legal union. These conditions are supported by convergence criteria when assessing a study registered by a specific country for EU membership.

The advantages of integration are: the free movement of people (workers) who have the opportunity to work in any EU Member State; the free movement of goods - the export of goods to EU countries without customs duties; the free movement of capital and services; the possibility for citizens to carry out financing projects in order



to receive significant amounts from the EU in order to support their businesses; the benefits of belonging to a large family of the country and the security of the country; that this membership provides; the opportunity to participate in the world's largest single market, with all the opportunities associated with growth and job creation; the irreversible consolidation of the economic and political reforms undertaken since 1989; facilitating access to the Structural Funds for the development of less prosperous regions of the Union.

The mere fact that since 1957 until now, only one country out of 28 that has joined this project has asked to leave the Union, despite the restrictions imposed by the Community's rules and standards, is of great importance, which proves the longevity of this concept. If we look only at the situation in Ireland, Greece, Spain and Portugal, where, at the time of accession, the average GDP per capita was around 50% of the EU average, then one can easily see the huge economic leap that these countries have made since joining the Union. At the time of Romania's and Bulgaria's accession, the GDP of these countries was 38% and 35% of the average GDP at EU level, respectively. This prospect is encouraging for the countries of Central and Eastern Europe that have joined or are in the process of joining the EU. But EU membership does not automatically mean integration into the Union. Integration is a much more complex and time-consuming process [3, p. 26].

Disadvantages of integration. Many believe that joining the EU will lead to the loss of sovereignty and national identity, or fear that the country will become more vulnerable to competition in the European single market. In general, the disadvantages of integration are related to the costs that will be borne by both the state and citizens. These are both public expenses, which will be covered from the state budget, and private expenses, which will be borne by economic agents, and individual expenses, which will be paid for various reforms. that migration will increase and that it will be more difficult to move to CIS countries.

For example, in Romania, too, many feared that in the first five years after accession, the country would have to spend more than €25 billion to meet EU standards. Yes, each member state of the Union participates in the formation of the



corresponding budget and European funds (in different proportions, which are 10, 15 or 20%, some countries 1, 2, 3% or even less than 0.5%, but at the same time they receive much larger financial amounts from European funds for the implementation of economic development programs. In Hungary, for example, almost all public construction projects are financed by EU funds. In Greece it is the same. Or another example: Romania contributed about 39.3 billion lei to the EU budget in three years (2022, 2023, 2024). At the same time, in the 15 years since accession, the country has received financial resources worth about **70 billion euros (euros, not lei)** from European funds for the implementation of various projects [11, p.99]. explained by scientists and those working in this field – some of them have already been mentioned above, but in practice EU membership has not affected the country.

It should be noted that when economic policy is conducted in the EU, respect for democratic principles is ensured in the activities of the European institutions. The EU has proven and is proving that it is the most viable integration organisation, the most advanced form of integration. In its work, the EU relies on special institutions: the *Council of the European Union, the European Parliament, which I consider to be too large in number (720 MEPs, elected in 2024), the European Council of Ministers, the European Commission, the Court of Justice of the European Communities (ECJ), the Court of Auditors, the European Central Bank, etc.* There are also a number of EU subsidiary bodies active in a specific area. Each of the institutions carries out its activities on the basis of the treaties adopted by the member countries. In the author's opinion, EU decision-making bodies must take concrete measures to make the work of the administrative apparatus more efficient and reduce costs for this purpose.

The role of some EU institutions of an economic and financial nature. EU Government. Traditionally, budget revenues include: a share of taxes on imports of goods into the EU (up to 25%); VAT revenues (but not more than 50% of the GNI of the member country); income from payroll tax for employees working in various EU organisations, etc. Each Member State participates in the formation of the EU budget with a share of around 1.3% of gross national income (calculated in 2018 prices), and each country's share of total EU budget revenue is different [11, p. 11. It should be



noted that of the total expenditure foreseen in the EU budget for the period 2014-2020 amounting to €1082 billion, 32.5% was allocated to the financing of cohesion policy (€351.8 billion).€) and 67.5% to finance other policies: agriculture, research, foreign policy, etc. (€730.2 billion). The EU's long-term budget for 2021-2027, together with the Next Generation Recovery Instrument (NGEU), supports the recovery from the COVID-19 pandemic and the EU's long-term priorities in various areas, provides for funding of €2.02 trillion (in current prices) [18]. More than half of EU funding is provided through 5 European Structural and Investment Funds: *the European Regional Development Fund (ERDF)*; *European Social Fund (ESF)*; *Cohesion Fund (CF)*; *European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD)* and *European Maritime and Fisheries Fund (EMFF)*. During an economic and financial crisis or pandemic, special funds are created.

Common policy of the European Union: general conclusions [11, p. 102-132].

The EU's economic policy is characterised by a better process of cooperation between Member States in terms of procedures for harmonizing interests, reaching consensus, developing and applying new forms of economic behaviour, etc. As an advanced form of understanding, the EU demonstrates that institutional harmonisation is becoming insufficiently effective, which necessitates the transfer of decision-making powers from national level to the level of the EU institutions. At Community level, common policies have emerged, developed and become more complex in response to the growing interdependence between Member States' economies for a number of reasons: mitigating the negative externalities resulting from the free functioning of the market mechanism; establishing the rules for the functioning of the market by removing obstacles of any kind to the free movement of factors; goods and services [3, p. 8-11; 4, p. 7-11].

The European Union occupies a crucial place in the development of the world economy and international economic relations. With 7.3% of the world's population, the EU is the world's third-largest economy in nominal terms and purchasing power parity (PPP). For example, in 2024, the EU's nominal GDP is estimated at US\$19.34 trillion [16]. In addition, all 27 EU countries have a very high Human Development



Index , according to the United Nations Development Programmetag. The EU accounts for more than 14% of global trade in goods and services. The EU, China and the United States are the three most important global players in international trade. In 2012, the EU was awarded **the Nobel Peace Prize**. Through its foreign and security policy, the EU plays an important role in international relations and defence. The Union has permanent diplomatic missions around the world and is represented at the UN, WTO, G7 and G20.

The EU is working hard to overcome the economic crises caused by the *COVID-19* pandemic and to create conditions conducive to the development of a more competitive economy with a higher level of employment. To this end, the EU, together with the Member States, has developed and implements certain strategies. For example, in recent years, **the Europe 2020 strategy** has been successfully implemented [11, pp. 132-135]. *smarter*, through more effective investment in education, research and innovation; *sustainable* – by transitioning to a low-carbon economy; and *inclusive* – by focusing on job creation and poverty reductiontag. Another example would be **the Sustainable Europe Strategy for Europe 2030**, in which the UN Sustainable Development Goals (SDGs) are a benchmark, a policy document that identifies the key elements for the transition to sustainable development [17]. The objectives of the strategy have been endorsed at the highest political level of the EU, providing a basis for future policies and activities. The EU institutions and Member States, including regional and local authorities, will work more closely together to ensure good coordination and set targets to be achieved by 2030.

Below are some indicators of economic and social development in the member countries of the European Union and their role in the world economy [14].

GDP (nominal): 2024	▲ \$19,34 trillion dollars;
GDP (PPP): 2024	▲ \$26,64 trillion dollars;
GDP per capita:2024	▲ \$43,300(nominal); ▲ \$59,050 (PPC);
Export	8.705 trillion dollars (2021);
Import	8.037 trillion dollars (2021);
Inflation (CPI))	7.5% (March 2022);
Average salary	€2.792 per month (2021);



Total FDI	€5.2 Trillion \$ (in appearance, 2012);
Gross <u>external debt</u>	\$13.05 Trillion \$ (31 December 2014);
Total foreign investment	▲ –€2,557.4 Billion; 17,5% GDP (2015);
Economic Assistance (Donations)	<u>ODA</u> , \$87.64 Billion.

Cooperation of the Republic of Moldova with economic and financial institutions [11, p. 154-184]. Aware of the realities of the system of international economic relations, after the proclamation of independence, the Republic of Moldova focused its efforts on promoting an active foreign economic policy. Since 1992, the Republic of Moldova has become a member of the most authoritative international financial and economic bodies. This marked the beginning of the country's self-assertion on the international arena, allowed it to obtain profitable state loans and credits, etc. Cooperation with the most important actors in the field of international monetary and financial management (*IMF, WB, WTO, EBRD, EIB*, etc.) It is of particular interest to any country, as they are called upon to accelerate the process of harmonisation of international economic cooperation and the implementation of consensus at regional level, having the opportunity to contribute in a timely manner to the correct dissemination of global objectives on a macroeconomic scale. In this context, the Republic of Moldova promotes active cooperation with the main international and regional economic and financial bodies.

Relations of the Republic of Moldova with the IMF [11, p. 155-158]. The International Monetary Fund is an international organization whose purpose is to promote international monetary cooperation, promote the balanced expansion and growth of international trade, as well as promote currency stability. The Republic of Moldova became a member of the IMF on August 12, 1992, benefiting from the financial assistance of this organization to support various economic programs and policies of national authorities, as well as technical assistance in a number of sectors, including monetary policy/central bank organization, monetary reporting system, banking supervision, etc. Since 1992, the relations of the Republic of Moldova have also carried out a good partnership activity with **the World Bank (WB) group**. The World Bank advocates for better governance and transparency, supporting important



reforms, investing in roads, energy, agriculture, schools, health facilities, thus contributing to improving the living standards of citizens. During this period, in total, more than 1.5 billion dollars have been allocated for over 70 operations in Moldova, over the years a number of projects have been implemented, significant progress in various fields, but the speed of reforms could be higher. **The World Bank's current program for Moldova includes 12 projects** with a total commitment of **US\$650 million**. Areas of support include regulatory reform and business development, modernization of public services, tax administration, cadastral registration, education, roads, health, agriculture, water, sanitation, and energy. Moldova for the period 2023-2027, supporting the Government's efforts to transition to a new economic model well aligned with *the priorities of the National Development Plan of the Republic of Moldova "European Moldova 2030"* [11, p. 158-162].

Relations of the Republic of Moldova with the WTO [11, p.163-173]. The purpose of joining the World Trade Organization was to accelerate the process of integration into the world economy, which would allow the creation of a democratic society with a market economy. On July 26, 2001, after 7 years of negotiations in the GATT and WTO, the country became a full member of the WTO. The impact of accession was extremely important from both an economic and social point of view. Accession to the WTO, together with the European integration process, has become a catalyst for economic transformation and reforms in the country, significantly increasing trade in goods through reduced tariffs, minimal trade barriers and predictable regulations. The trade structure has also improved due to the policy of export diversification, both in terms of partners and types of products. Accession to the international trading system within the WTO has also contributed to the economic and resident development of the country. In recent decades, the geographical orientation of the country's foreign trade has changed significantly, becoming predominantly EU-oriented. At the same time, there is an alarming situation in this area, for many years imports have significantly exceeded exports of goods and services (Table 1).

**Table 1. Foreign trade of the Republic of Moldova in recent years.**

Year	EXPORT (\$ million)	Uniunea Europeană	CSI	Other countries	IMPORT (\$million)	Uniunea Europeană	CSI	Other countries
2000	▲471.5	35,05%	58,56%	6,39%	▲776.4	53,22%	33,46%	13,32%
2010	▲1.541.5	47,29%	40,48%	12,23%	▲3.855.3	44,20%	32,60%	23,20%
2015	▼1.966.8	61,90%	25,03%	13,07%	▲3.986.8	49,01%	25,53%	25,46%
2020	▲2.467.1	66,5%	15,2%	18,3%	▲5.416.8	45,3%	24,1%	30,6%
2023	▲4.048.6	65,4%	22,2%	12,4%	▲8.673.7	48,3%	18,6%	33,1%

Source: Author's Ela based on NBS data from the Republic of Moldova.

Relations of the Republic of Moldova with the EBRD [11, p.173-175]. The European Bank for Reconstruction and Development is an international organization whose purpose is to support the economic development of the countries of Central and Eastern Europe, the Southern and Eastern Mediterranean and Central Asia, as well as to disseminate the principles of a market economy, to encourage private initiative and entrepreneurship. The Republic of Moldova became a member of the EBRD on 5 May 1992. is €30.01 million. During this period, the republic has received and continues to receive financial support from the EBRD. Since joining the Republic of Moldova, 163 projects have been implemented, with a total investment of over 2 million euros. The EBRD will provide financial support for the modernisation of rail infrastructure by providing a loan of €23 million in two instalments over a period of 15 years.

Cooperation between the Republic of Moldova and the EIB. The European Investment Bank is interested in developing cooperation relations with the Government of the Republic of Moldova [11, p. 176-179]. In recent years, the Republic of Moldova intends to focus on infrastructure development projects, and in this regard, the role of the EIB is important in implementing these objectives of the government. Currently, *10 EIB projects* are being implemented in the Republic of Moldova, with a budget of over *€423 million*. For example, *EIB Global will invest €41.2 million in the rehabilitation of Moldova's railway infrastructure*. It should be noted that since the start of its activities in Moldova in 2007, the EIB has allocated **more than €1.19 billion to 33 projects**, supporting EU policy objectives in the following sectors: transport, energy, small and medium-sized enterprises, agriculture, municipal infrastructure [11, p. 176-179].



In the Republic of Moldova, a number of projects are also implemented with the financial support of other international and regional economic and financial organizations, such as: the United Nations Development Programme (UNDP), with which it works in almost 179 countries and territories; The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), which in recent years has provided support and assistance to Moldova through **15 projects** worth **about 2 million dollars and in 5 other regional projects**, our country was also a beneficiary; USAID (United States Agency for International Development), which contributes to the consolidation of the Republic of Moldova as a competitive and democratic European country, contributing to the country's economic growth.

Republic of Moldova in regional and cross-border cooperation [11, p.186-200]. In the country's foreign policy, regional cooperation is an additional dimension of the European integration agenda as an integral part of economic diplomacy. The Republic of Moldova, being at the crossroads of several regional structures, has actively participated in a number of international organizations and initiatives in recent years – the Council of Europe, the United Nations Economic Commission for Europe, the Eastern Partnership with the EU, the Black Sea Economic Cooperation Organization, regional cooperation with South-Eastern European countries, cross-border cooperation, etc. The Black Sea region is a subject of priority interest, in the long term, in the country's foreign policy. In 2007-2013, *a total* of 40 joint projects *with partners from the Republic of Moldova* were financed within the BSEC. Another example of regional cooperation is the interaction of the GUAM countries (Georgia, Ukraine, Azerbaijan and the Republic of Moldova). Initially, there were five states (including Uzbekistan) with the name GUUAM. However, in reality, the work of this regional structure leaves much to be desired. At the same time, it should be noted that from the very beginning the Russian authorities and experts had a negative attitude towards GUAM, seeing in it a threat to their interests, very much wanting to maintain political control in the region through very specific methods. *cross-border cooperation structures within the Euroregion with Romania and Ukraine.*



Moldova – candidate for EU accession; EU accession procedure has begun.

With the implementation of the Association Agreement, the liberalization of the visa regime and the gradual integration into the EU internal market, the Republic of Moldova is effectively integrated into the European political and economic space. On 28 November 1994, the Partnership and Cooperation Agreement (PCA) was signed. The next step was the adoption of the European Neighbourhood Policy Action Plan, adopted in February 2005. replaced by the Association Agenda agreed on the basis of the Association Agreement between the Republic of Moldova and the EU.

It is worth noting that, due to the political instability in the republic, at certain stages these cooperation relations were not maintained at the appropriate level. With the election of Mrs. **Maia Sandu** as president of the country in 2022, everything changed radically. European integration remains the main and irreversible objective of the internal and external agenda of the Republic of Moldova. In recent years, a number of important events have taken place in support of the European pathway. On May 21, 2023, the Grand National Assembly was held in Chisinau with the participation of tens of thousands of people, at which the resolution on the European integration of the Republic of Moldova – "**European Moldova**" – was presented; On June 1, 2023, the Republic of Moldova hosted the European Political Community Summit, attended by about 50 leaders from Europe, where the topics of European security, cooperation and energy issues were discussed.

In 2014, the Republic of Moldova, together with all EU member states, signed the Association Agreement, on June 23, 2022, the European Council granted the country the status of candidate country, and on December 15, 2023, the EU decided to start accession negotiations with the Republic of Moldova, and Ukraine decided to hold a referendum to objectively establish the citizens' wishes regarding the country's integration process into the European Union.

Summaries and conclusions

International economic integration is a special form in international economic relations. The process of international economic integration can be considered as a qualitatively superior method of economic cooperation between countries, which is



carried out in different forms on the basis of certain agreements. This usually requires a transition period to make the necessary adjustments between partner countries. Currently, there are more than 20 international integration economic associations in the world, which include the main regions and continents of the globe (NAFTA, CELAC, MERCOSUR, APEC, G7, G20, EU, BRICS, SCO, CIS, UVEA, GUAM, etc.). *The EU considers itself the most advanced form of integration, being a political and economic union of 27 member states.* A special role in the development of the international economic integration process is played by the economic and financial bodies of the United Nations (IMF, IBRD, WTO, etc.), transnational companies and various other international and regional organizations.

In 2014, the Republic of Moldova, together with all EU member states, signed the Association Agreement, on 23 June 2022, the European Council granted the country the status of candidate country, and on 15 December 2023, the EU decided to start accession negotiations with Moldova and Ukraine. In October 2024, a referendum was held in the republic, where the majority of the population voted in favor of Moldova's integration into the EU. The main task is to successfully conduct these negotiations, in order to ensure the implementation of the tasks set to promote the necessary reforms in our country. It is necessary to strengthen the country's society in order to successfully secure its path to EU membership. Deepening the country's integration into international and regional economic structures and, first of all, its integration into the EU is aimed at economic development and improving the living standards of the population.

Referințe:

1. Anuarul UNCTAD Anuarul UNCTAD. <https://hbs.unctad.org/total-merchandise-trade/>
2. Барроуз Мэтью. Будущее раскрыто. Каким будет мир в 2030. Перевод с англ. М.Гескиной. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2015. -352 с.
3. Bârdan V. Integrare economică și economie europeană: Suport de curs. Chișinău: Tehnica UTM. Vol. I, 2024. -275p.



4. Bârdan V. Integrare economică și economie europeană: Suport de curs. Chișinău: Tehnica UTM. Vol. 2 , 2024 –366p..
5. Economia integrării europene: teorie, practică, politici /Willem Molle: trad. Eugenia Papuc. Ch.: Epigraf SRL, 2009. – 493 p.
6. Economie mondială și integrare europeană: [pentru uzul studenților]. Colectiv de autori. Coord.: B. Chistruga, N. Lobanov. – Ch.: ASEM, 2016. -273 p.
7. Eficientizarea comerțului exterior al Republicii Moldova: Monografie /Ilian Galben, red. resp. Petru Roșca. Chișinău: ULIM, Print-Caro, 2012.-320 p.
8. Ignat I., Pralea S. Economie mondială. Iași, Sedcom Libris, 2013. -260 p.
9. Integrarea și cooperarea economică regională: monog.coord. B.Chistruga. - Ch.: ASEM, 2010. -330p.
10. Probleme globale ale economiei mondiale/Curs în tehnologia ID-IFR autor: Miltiade Stanciu - Bucuresti, Ed. Fundației *România de Măine*, 2012. -125 p.
11. Roșca P. Integrare economică și economie europeană: *Suport de curs*. Chișinău: Print- Caro, 2024. – 284 p. ISBN 978-9975-180-55-9.
12. Țău N. Strategii promoționale ale relațiilor economice internaționale. - Ch., ULIM, 2009 (Tipogr. "Print-Caro" SRL). – 316 p.
13. World Investment Report 2022. https://unctad.org/system/files/official-document/wir2022_en.pdf
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Economy_of_the_European_Union (citat 27.07.2024)
15. <https://www.vedomosti.ru/politics/articles/2024/07/05/1048105-o-chem-dogovorilis-uchastniki-sammita-shos>
16. [https://ro.wikipedia.org/wiki/Lista_%C8%9B%C4%83rilor_%C3%AEn_fun c%C8%9Bie_de_PIB_\(PPC\)#Vezi_%C8%99i](https://ro.wikipedia.org/wiki/Lista_%C8%9B%C4%83rilor_%C3%AEn_fun c%C8%9Bie_de_PIB_(PPC)#Vezi_%C8%99i).
17. https://commission.europa.eu/publications/sustainable-europe-2030_ro
18. <https://www.fonduri-structurale.ro/2021-2027>
19. https://statistica.gov.md/files/files/publicatii_electronice/Moldova_in_cifre/2024/Moldova_cifre_2024.pdf (citat 30.07.2024)
20. [https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_GDP_\(nominal\)](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_GDP_(nominal))



21. <https://cursdeguvernare.ro/tarile-cu-cele-mai-mari-datorii-top-30-pe-ce-loc-e-romania.html>



УДК 628.3:621.311.2

TREATMENT OF WASTEWATER FROM THERMAL POWER PLANTS AND THE EVALUATION OF A PHYSICO-ELECTROCHEMICAL PURIFICATION METHOD

ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА АПРОБАЦІЯ ФІЗИКО-ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО МЕТОДУ ОЧИСТКИ

Tychkovskiy S.I. / Тичковський С.І.

postgraduate student / аспірант.

Chelyadyn L.I. / Челядин Л.І.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0003-3360-7274

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

Ivano-Frankivsk, Karpatska, 15, 76019

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

Івано-Франківськ, Карпатська, 15, 76019

Анотація. Приведено характеристику стічних вод, а також технологій та обладнання для їх очищення, які встановлені на ТЕС, допустимих концентрацій шкідливих речовин, характерних для енергетичної галузі перед скиданням у водойми. Склад перерахованих стоків різний та визначається типом теплових електростанцій (ТЕС) та основного обладнання, видом палива, складом вихідної води, способом водопідготовки. Проведено апробаційні дослідження з очищення обмивальних стоків з гідрозолоуловлювача за фізико-електрохімічною технологією. Встановлено підвищення ступеня очищення стоків фізико-електрохімічною очисткою до 91,2-95,2% за показником ХСК.

Ключові слова: стічні води, фізико-електрохімічна очистка, ступінь очищення.

Вступ.

Антропогенна міграція хімічних елементів стала основним фактором зміни навколишнього середовища. Надходження хімічних елементів в навколишнє середовище більше ніж у 100 разів перевищує природний процес.

В зв'язку із збільшенням виробництва електроенергії, добування й переробки нафти, газу й вугілля, виробництва металів, цементу, добрив та інших продуктів хімічної промисловості, атмосфера забруднюється швидкими темпами. Щорічно в світі спалюється 7 млрд. тон умовного палива промисловими, енергетичними та іншими об'єктами [1], комплексами, та викидається понад мільярд тонн зважених і газоподібних домішок, що завдають екологічних збитків довкіллю та економічних втрат суспільству. За останні 100 років в атмосферу потрапило 1 млн. тон кремнію; 1,5 млн. тон миш'яку; 0,9 млн.



тон кобальту та багато інших шкідливих речовин. Зараз в атмосфері знаходиться майже 20 млн. тон зважених частинок. Значна забрудненість атмосфери приводить до збільшення захворювань людей та зниження біологічної активності флори й фауни. Найефективнішим методом захисту повітряного басейну від забруднення шкідливими речовинами є впровадження перспективних безвідходних ресурсо-енергозберігаючих технологічних процесів із замкнутими виробничими циклами. Такі технології дозволяють виключити або суттєво знизити викиди шкідливих речовин в атмосферу. Однак це не завжди технологічно можливо й економічно доцільно. Тому для більшості підприємств очищення газів є одним із заходів захисту атмосферного повітря від забруднення. Для виробництва електроенергії потрібна величезна кількість води для використання практично на кожному етапі процесу, від систем живлення котла до охолоджувальних конденсаторів і підшипників до скрубєрів забруднюючих речовин. Чиста вода важлива не тільки при прийомі, але і при відході. Законодавство продовжує розвиватися, посилюючи обмеження та зміщуючи попит у бік нульового скидання рідини. Це означає, що інновації в очищенні води для електроенергетики збільшуються.

Згідно з аналізом тенденцій, попит на воду зростає на 55% через зростання населення світу, а попит на електроенергію зростає на 45 трлн кВт-год, або приблизно на 44% більше, ніж у 2018 році. Це створює дилему, коли електростанції залежать від води для виробництва чистої енергії. Відповідь – передова технологія в поєднанні з досвідом, щоб знайти розумніші, чистіші способи збереження та переробки води, щоб задовольнити потреби в електроенергії для електронного світу, який стає все більш пов'язаним.

Виробництво електроенергії є одним з найбільших промислових споживачів води, більшість води використовується для охолодження на місці. Поряд з охолоджувальною водою, котли та системи десульфуризації димових газів (FGD) або системи мокрого очищення також сприяють загальному використанню води. Через великий обсяг необхідної води електростанції зазвичай розташовують поблизу природних джерел води, таких як річки, де вони



можуть забирати воду в станцію для використання. Неочищена або недостатньо очищена вода може сприяти ерозії та пошкодженню обладнання для виробництва пари. Неадекватно очищені викиди стічних вод можуть порушувати екологічні норми. Завдяки передовим технологіям нові рішення революціонізують спосіб очищення, переробки та повторного використання води для виробництва чистої відновлюваної енергії.

Системи водопідготовки – це важливий елемент будь-якого підприємства у сфері енергетики, оскільки саме якість води, що використовується, безпосередньо впливає на довговічність і продуктивність роботи.

Основний текст.

На підприємствах ТЕС, вода після охолодження конденсаторів турбін і охолоджувачів повітря зазвичай несе так звані теплові забруднення, оскільки її температура на 8-10 °C вище температури води у вододжерелі. У деяких випадках вода що охолоджує, може привносити в природні водойми сторонні речовини. Для зниження рівня забруднення ґрунту та ґрунтових вод на теплових електростанціях були побудовані локальні очисні споруди.

Другий спосіб зниження рівня забруднення полягає в зборі стічних вод у спеціально створені ємності з подальшим очищенням за допомогою відстійників і фільтрів, в яких як фільтруючий матеріал використовується антрацит або активоване вугілля.

У сучасному світі проблема забруднення стічних вод є однією з найбільш актуальних та складних для вирішення. Для збереження екологічної стійкості та зменшення впливу на природне середовище виникає потреба в розвитку та впровадженні нових методів очищення стічних вод.

Паралельно з очищенням води виникає питання зменшення відходів, зокрема шламів водоочищення та золи, які утворюються в процесі. Їхнє ефективне перероблення може стати додатковим джерелом корисних ресурсів або енергії, сприяючи зменшенню негативного впливу ТЕС на навколишнє середовище.



Основними методами очищення води є: механічне очищення, хімічні – абсорбційне та адсорбційне очищення, ультразвукове, осмотична очистка, магнітне очищення, а також електричні, які включають процеси електрокоагуляції, електрофлотації [2]. Електрохімічне очищення використовує електричний струм для іонізації розчину, що може допомогти розчинити тверді відкладення на металевих поверхнях трубопроводів та обладнання і утворювати коагуляційні та флотаційні хімічні сполуки.

У іноземній публікації [3] проаналізовано декілька технологій очищення стічних вод, що включають фізичні, хімічні та біологічні методи. Наведено сучасний стан різних існуючих методів очищення стічних вод та їхні обмеження. Виділено недоліки різноманітних наявних технологій очищення стічних вод та сучасні тенденції у сфері очищення стічних вод.

Стічні води, які містять мінеральні кислоти або луги, перед їх скиданням у природні водойми або перед повторним використанням у технологічних процесах піддають нейтралізації. Практично нейтральними вважаються води які мають значення рН 6,5-8,5. Для нейтралізації кислотних вод використовують сполуки основного характеру, а нейтралізації лужних вод – кислотного характеру. Вибір методу нейтралізації залежить від об'єму і концентрації стічних вод, а також від способу їх утворення, наявності і вартості реагентів. При реалізації заходів з нейтралізації стічних вод з утворенням осадів слід враховувати їх характер, токсичність та можливі варіанти їх застосування в подальшому.

В ІТТФ Національної академії наук [4], розроблено багатоцільову аераційно-окислювальну установку (АОРТ) роторного типу, що працює за методом дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Ця установка дозволяє прискорити швидкість тепло- та масообміну хімічних реакцій у воді та водних системах на 25-30 %. Це дає можливість скоротити тривалість процесів очищення, знизити енергоспоживання у 2-3 рази та витрати реагентів на 20-25 %. Установка АОРТ використовується для очищення стічних вод від заліза, марганцю, сірководню, вуглекислого газу, сульфатів та нітратів.



В університеті розроблено технологію і локальну установку очищення стічних вод різних об'єктів, а також фільтрату полігонів ТПВ за технологією, яка включає процеси фізико-електрохімічного очищення з використанням ефективного устаткування [5]. Застосування відповідного методу очищення води залежить від конкретних умов експлуатації, складу води та особливостей обладнання ТЕС. Комбінація різних методів може бути використана для досягнення оптимальних результатів.

За даними державної статистичної звітності за ф. 2-ТП [6] в 2022 р. господарствами та населенням області забрано 76,038 млн.м³ води, в т.ч. з поверхневих водойм – 70,049 млн.м³ , з підземних джерел – 5,990 млн.м³ води. Порівняно з 2021 роком забір води зменшився на 14,999 млн.м³ . У 2022 році у поверхневі водні об'єкти області скинуто 55,048 млн.м³ , зворотних (стічних) вод, що на 9,09 % менше, ніж у 2021 році.

Перелік забруднюючих речовин і фактична середня концентрація, мг/дм³: завислі речовини 14,607; сульфати 250; хлориди 30; БСК5 1,53; ХСК 26,36; нафтопродукти 0,25.

Для ефективного очищення стічних вод ТЕС проведено апробаційні дослідження очищення фізико-електрохімічним методом.

Процес обробки водних середовищ у запропонованому електропристрої [7] відбувається наступним чином. Стічна вода поступає в міжелектродний простір та піддається за певної напруги, що подається на електроди, обробці при різній щільності струму за рахунок зміни відстані між електродами і площі їх поверхні. Такий пристрій дає змогу змінювати заряд часток забруднень, що спричиняє їх злипання, а деякі розчинні забруднення перетворюються у тверді нерозчинні, які відділяються потім у відстійнику чи іншому апараті, наприклад фільтрі. Показники стічної води визначали згідно зі стандартними методиками, зокрема ХСК згідно з [8].

Дослідження проводили на лабораторній установці за методикою, що описана нижче, а схема установки приведена на рисунок 1.

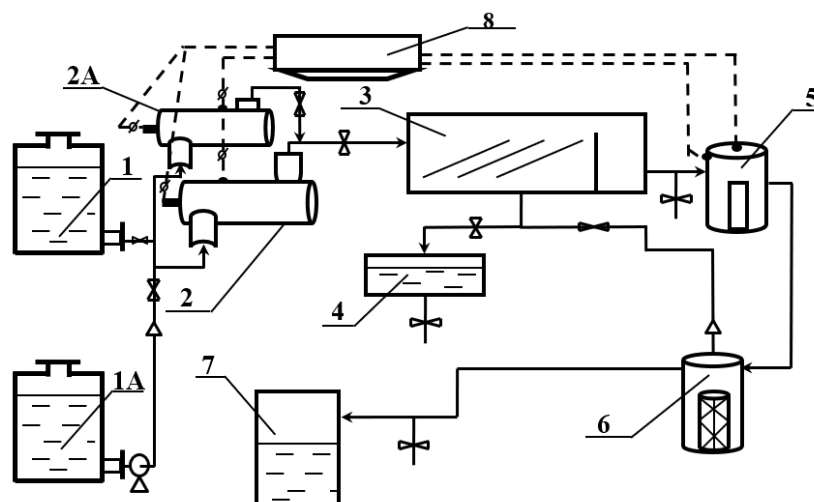


Рисунок 1 - Схема лабораторної установки з очищення стічних вод: ємність (1, 1A) для стічної води, електропристрій-1 (2, 2A), відстійник з похилими площинами (3), ємність збору шламу водоочищення (4), електропристрій-2 (5), фільтр-адсорбер (6), ємність для збору очищеної води (7), джерело струму (8) з випрямлячем.

Джерело: [7]

Очищення стічних вод від завислих відбувається у відстійнику з похилими площинами в якому легкі зависі піднімаються у верхню частину відстійника за рахунок газів електролізу, які утворюються при електрообробці стічної води в (2) і збираються з поверхні води відвідним жолобом у ємність збору шламу водоочищення (4), а середні і важкі зависі після контакту з похилою площиною сповзають до нижнього жолобу та поступають у ємність (4). З кінцевої частини ВПП частково очищені стоки протікають через другий електропристрій-2 (5), де відбувається окиснення розчинних забруднень.

Результати очищення стічних вод від завислих за допомогою попередньої обробки в електропристрої-1 перед горизонтальним відстійником з похилими площинами (ПП) з попередньою електрообробкою 12-24в наведені у таблиці 1.

На основі вище приведених результатів досліджень, встановлено, що електрообробка стічних вод перед протіканням їх через тонкошаровий відстійник впливає на ступінь очищення стічних вод, оскільки утворені мікробульбашки кисню та водню флотують н/п у верхню частину відстійника, де вони з



поверхні води відділяються перед переливом на гребні. Зміна кута нахилу похилих площин у тонкошаровому відстійнику, який виставляли під різним кутом нахилу впливає на вміст завислих наступним чином: за кута нахилу похилих площин 30° – 84,1-89,9 %, 45° – 82,7-89,5 % і 60° – 81,5-88,2%. Це можливо пояснити гідродинамікою потоку води, оскільки за меншого кута нахилу площини завислі не встигають сповзти вниз для виходу у шламонакопичувач, а частково змиваються з пластини потоком води, що збільшує їх кількість після відстійника.

Таблиця 1 – Показники очищення обмивальних стічних вод ТЕС

Показники Проба стічної води	Показники стічних вод до очищення, мг/дм ³			Показники стічних вод після очищення, мг/дм ³			Ступінь очищення, %	
	pH	Завислі	ХСК	pH	Завислі	ХСК	Завислі	ХСК
1	7,2	14,6	26,3	7,1	2,36	5,5	76,9	79,1
3	7,1	11,4	21,5	7,4	2,14	1,9	82,0	91,2
5	7,2	14,6	26,3	7,3	1,05	1,5	89,1	94,3
7	7,3	12,5	25,4	7,1	1,13	1,2	90,9	95,2
9	7,2	15,6	28,1	7,2	1,5	2,5	88,3	94,6

Авторська розробка

Встановлено, що якість стічних вод підвищується за показником ХСК внаслідок зменшення в них шкідливих компонентів, які відділяються при електрофлотації на I етапі очищення та електроокислення розчинних токсичних компонентів на II етапі, що впливає на узагальнений показник ХСК, який вказує на забруднення стічної води.

Для підвищення ефективності запропонованої технології планується провести дослідження і розробити автоматизацію фізико-електрохімічного процесу очищення стічних вод.



Висновки.

1. Очищення стічних вод поглинальним розчином на теплових електростанціях (ТЕС) є недостатньо ефективним методом для зменшення забруднення стоків, що впливає на навколишнє середовище.

2. Показник ХСК при очищенні стічних вод за фізико-електрохімічною технологією складає 91,2-95,2%, оскільки зменшується вміст завислих та інших забруднень.

Література:

1. Статистичний збірник «Довкілля України за 2024 рік», – Київ, 2025. – 226 с.
2. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод / Запольський А.К., Мішкова-Клименко Н.А. та ін. – К.: Лібра, 2000. – 552 с.
3. Nishat, A., Yusuf, M., Qadir, A., Ezaier, Y., Vambol, V., Khan, M. I., ... & Eldin, S. M. (2023). Wastewater treatment: A short assessment on available techniques. *Alexandria Engineering Journal*, 76, 505-516.
4. Очищення стічних вод теплоелектростанцій (ТЕС) / О. М. Ободович, В. В. Сидоренко, Ю. В. Булій, О. Є. Степаненко // Теплофізика та теплоенергетика. – 2023. – Т. 45, № 2. – С. 69-76.
5. Chelyadyn, L., Kostyshn, V., Chelyadyn, V., Romanyshyn, T., & Vasechko, V. (2020). Wastewater purification technology by two-stage treatment in electrical device of a compact local installation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10-105), 63-70.
6. Статистична звітність об'єкта ЗАТ «Бурштинська ТЕС» за формою «2-ТП водгосп» «2-ТП повітря», за 2020-2024 рр.
7. Патент на корисну модель №145961 Україна МПК) C02F1 1/461(2006.01 / Електропристрій обробки водного середовища Челядин. Романишин Л.І., Челядин В.Л.; Лютак І.З., Васечко В.Б Романишин Л.І., Челядин В.Л.; Лютак І.З., Васечко В.Б; заявл. 09.06.2020; 13. 01.2021. Бюл. № 2 – 3.
8. Якість води. Визначення хімічної потреби в кисні (ISO 6060: 1989, IDT): ДСТУ ISO 6060: 2003. - [Чинний 2003-10-06].



Abstract. *The characteristics of wastewater, as well as the technologies and equipment used for its treatment at thermal power plants (TPPs), are presented. The permissible concentrations of harmful substances typical for the energy sector before discharge into water bodies are outlined. The composition of the listed wastewater varies and depends on the type of thermal power plant, the main equipment, the type of fuel used, the composition of the source water, and the water treatment method. Pilot studies were conducted on the treatment of water from a hydraulic ash collector using a physico-electrochemical technology. It was found that the degree of wastewater purification using physico-electrochemical treatment increased to 91,2-95,2% based on the COD (Chemical Oxygen Demand) indicator.*

Keywords: *wastewater, physico-electrochemical treatment, purification degree.*

Науковий керівник: д.т.н., проф. Челядин Л.І.

Статтю надіслано: 24.05.2025 р.

© Тичковський С.І.



UDC 602.1:681.5-048.57(045)

AUTOMATED CONTROL OF THE PROCESS OF SORTING FRUIT AND VEGETABLE RAW MATERIALS WITH MONITORING ENERGY CONSUMPTION TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF PRODUCTION

Tsvirkun L.O.*c.p.s.*

ORCID: 0000-0002-1879-0608

*Mykhailo Tuhan-Baranovskyi Educational and Scientific Institute of Economics and Trade
of Kryvyi Rih National University (Mykhailo Tuhan-Baranovskyi ESIET KNU)**Kryvyi Rih, Ukraine***Omelchenko O.V.***c.t.s., as. prof.*

ORCID: 0000-0003-0704-5909

*Mykhailo Tuhan-Baranovskyi Educational and Scientific Institute of Economics and Trade
of Kryvyi Rih National University (Mykhailo Tuhan-Baranovskyi ESIET KNU)**Kryvyi Rih, Ukraine***Tsvirkun S.L.***c.t.s.*

ORCID: 0000-0001-5430-3427

*Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine***Perekrest V.B.***Teacher of the department of general engineering disciplines and equipment*

ORCID: 0000-0003-1753-0721

*Mykhailo Tuhan-Baranovskyi Educational and Scientific Institute of Economics and Trade
of Kryvyi Rih National University (Mykhailo Tuhan-Baranovskyi ESIET KNU)**Kryvyi Rih, Ukraine***Galintovsky V.K.***A graduate of a master's degree**Mykhailo Tuhan-Baranovskyi Educational and Scientific Institute of Economics and Trade
of Kryvyi Rih National University (Mykhailo Tuhan-Baranovskyi ESIET KNU)**Kryvyi Rih, Ukraine*

Abstract. The article proposes an automated control system for the sorting process of fruit and vegetable raw materials with fast algorithms for analyzing the shape of raw materials to isolate poor-quality samples from the general flow with monitoring energy consumption. The automated complex allows you to form optimal values of control influences to improve the quality of the initial product with minimal energy consumption. It is proposed to implement energy consumption control to increase the energy efficiency of production using control and measuring devices in the form of a microcontroller (sensors) and a converter to achieve sustainable development goals. Built-in sensors allow you to monitor energy consumption in real time and predict possible changes.

Keywords: sorting, automation, energy efficiency, renewable energy sources, control and measuring equipment, fruit and vegetable raw materials, food industry.

Introduction. The food industry plays an important role for the world's population, but at the same time it is the largest consumer of energy, which is needed



at all stages of the food chain directly for production, processing and transportation. As is known, food systems account for about 30% of total global energy consumption. About a quarter of all energy is consumed at the production stage, 45% – for food processing, 30% – for retail trade, food preparation. During the processing and storage of raw materials, energy is used for processes such as drying, cutting, grinding, cleaning, including cooling and other forms of processing before distribution, which are very energy-intensive [1]. Therefore, one of the primary tasks of the food industry is to solve the problem of significant total energy consumption. Reducing specific energy consumption should be in line with the concept of the «European Green Deal» and contribute to making production resource-efficient and cleaner. Accordingly, in modern conditions, it is necessary to use alternative energy sources, which will play a decisive role in energy consumption during such energy-intensive operations as drying, grinding, cleaning, and cooling of food raw materials.

Main text. Modern development of the food industry is characterized by the introduction of intensive technologies, among which automation tools occupy one of the leading places. They allow monitoring and optimization of technological processes in real time and predicting potentially expected results [2]. To achieve sustainable development goals, energy consumption is monitored to improve energy efficiency in production. The growing demand for food, coupled with fluctuations in fossil fuel prices, has prompted the search for environmentally friendly alternative energy sources. The feasibility of using renewable energy sources in the food production process will help reduce the use of traditional energy in the context of the energy crisis and the increase in demand for fossil fuels. Recently, much attention has been paid to innovative green energy technologies in the food industry:

- solar energy, namely solar panels – a device that absorbs sunlight and converts it into electrical energy, which is stored in solar batteries attached to the panels;
- wind energy, namely the use of wind at industrial facilities, is becoming a popular trend, as such energy is one of the most affordable and clean;
- automation tools that improve raw material quality control monitor energy consumption to improve energy efficiency.



One of the key positions of the sustainable development strategy is to minimize the impact of the food industry on the environment. New technologies open up opportunities to modernize existing equipment by integrating artificial intelligence into production processes, using automated quality control systems and implementing energy-efficient solutions. In today's conditions, enterprises are forced not only to ensure the safety and sustainability of technological processes, but also to constantly improve their economic efficiency and implement innovative technologies to reduce the consumption of water, energy and other resources. A significant effect can be achieved by improving automated process control systems with the inclusion in the structure of the system of an intellectual component of a mathematical apparatus operating on the basis of fuzzy logic algorithms, neural networks, etc.

Automation of technological processes will reduce the amount of waste, improve quality control of raw materials. For fast and high-quality, sorting, less labor-intensive modern technologies have been created, such as machine vision systems. This method is based on obtaining an image of samples, analyzing the images, comparing them with the standard and making a final decision on accepting or rejecting the samples [3]. Using machine vision systems and image processing methods, it is possible to classify plant materials by size, shape and color. Conduct a selection of unsuitable samples that do not meet quality criteria (green skin, sprouts, mechanical damage) and impurities. Among all the sorting criteria, shape is one of the main indicators, since damage and cuts during harvesting and processing add additional types of shapes. Therefore, reliable automatic control systems are needed to increase the speed of production and improve the accuracy and efficiency of the sorting process of plant materials.

Recently, many studies have been devoted to improving sorting processes, using various technologies and highlighting the most important characteristics by which the sorting process can be carried out: by shape [4], by size [5]. However, there is a need to improve the recognition of not only external defects (green skin, sprouts, bruises, mechanical damage), but also internal defects (black core, water core, frost damage, internal cavities). Among all the most important characteristics by which the sorting process is carried out, is the shape of the object, since damage and cuts during



harvesting and processing can add additional types of shapes. Therefore, it is relevant to develop a generalized structure of the visual control system of the flow of plant materials on the sorting device using technical means and technologies for digital image processing. Analysis of the shape of the object based on machine vision systems and identification of samples that do not correspond to the specified shapes for extraction from the sorting device with monitoring of energy consumption through the use of control and measuring equipment.

An automated control system for the sorting process of fruit and vegetable raw materials with fast algorithms for analyzing the shape of raw materials to isolate low-quality samples from the general flow is proposed (Figure 2).

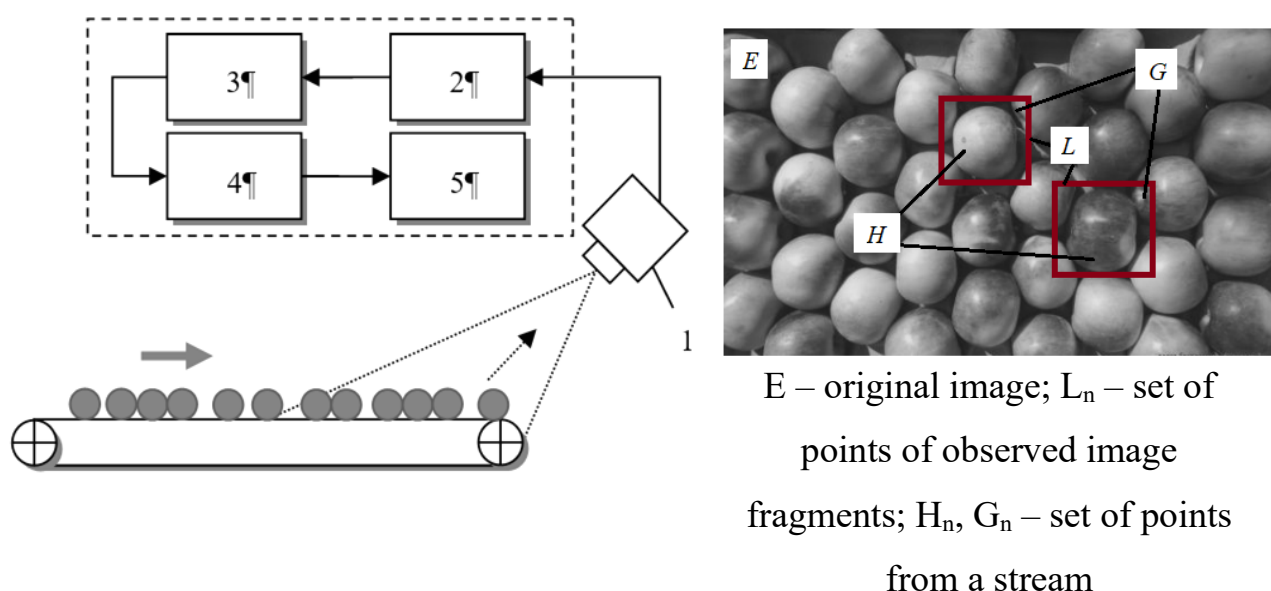


Figure 1 – Generalized structure of the visual control system for the flow of fruit and vegetable raw materials

Authoring

Figure 1 shows: 1 – video camera; 2 – system for converting video into a sequence of photographic images; 3 – system for improving image quality; 4 – image object recognition system; 5 – initial interface of the system.

Using video camera 1, a video signal is generated that transmits the dynamics of the movement of objects entering the field of view of the video camera. To increase the area of the section of the flow of objects monitored by the video camera, its optical



axis is located at a certain right angle to the plane of movement of the conveyor belt. Based on the video signal, converter 2 generates a sequence of raster images corresponding to the frames of the input video signal. Changes in the characteristics of the flow, ambient air, technological and random factors cause distortion of photographic images. The function of improving the quality of images is implemented by the corresponding system 3. After removing distortions and noise, the images are sent to the data recognition system 4.

The automated complex allows you to form the optimal values of control influences to improve the quality of the output product with minimal energy consumption. It is advisable to control energy consumption using control and measuring equipment in the form of a microcontroller (sensors) and a converter [6]. The system of control and measuring instruments used for measurements has an input in the form of the actual value of the measured quantity, and the output in the form of the measured value of the variable. To achieve sustainable development goals, it is necessary to control energy consumption to increase energy efficiency of production.

An automated system for controlling the sorting process of fruit and vegetable raw materials with fast algorithms for analyzing the shape of raw materials for isolating poor-quality samples from the general flow with monitoring energy consumption using control and measuring equipment is proposed. The automated complex allows you to form optimal values of control influences to improve the quality of the initial product with minimal energy consumption. It is advisable to control energy consumption using control and measuring equipment in the form of a microcontroller (sensors) and a converter.

Summary and conclusions. It is noted that, the food industry plays an important role for the world's population, but at the same time it is the largest consumer of energy, which is needed at all stages of the food chain directly for production, processing and transportation. During the processing and storage of raw materials, energy is used for processes such as drying, cutting, grinding, cleaning, including cooling and other forms of processing before distribution, which are very energy-intensive. Therefore, one of the primary tasks of the food industry is to solve the problem of significant total energy



consumption. Reducing specific energy consumption should be in line with the concept of the «European green deal» and contribute to making production more resource-efficient and cleaner. Accordingly, in modern conditions, it is necessary to use alternative energy sources, which will play a decisive role in energy consumption in the process of such energy-intensive operations as drying, grinding, cleaning and cooling of food raw materials.

It is believed that, to achieve sustainable development goals, energy consumption must be controlled to increase energy efficiency of production. An automated control system for the sorting process of fruit and vegetable raw materials with fast algorithms for analyzing the shape of raw materials to isolate low-quality samples from the general flow is proposed with monitoring of energy consumption through the use of control and measuring equipment in the form of a microcontroller (sensors) and a converter. They allow for real-time control of energy consumption and forecast potential changes.

References:

1. Renewable energy for agri-food systems. URL: Renewable energy for agri-food systems – Towards the Sustainable Development Goals and the Paris agreement.
2. Combining MES and AI for industrial sustainability. URL: <https://www.automationworld.com/analytics/article/55267880/control-system>.
3. Roya Hassankhan, Hossein Navid. Potato sorting based on size and color in machine vision system // Journal of agricultural science. 2012. Vol. 4. P. 235–244.
4. Wang J., Xiong Z. Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system // Society of agricultural engineering. 2016. Vol. 32. P. 272–277.
5. Kong Y., Gao X., Li H. Potato grading method of mass and shapes based on machine vision // Society of agricultural engineering. 2012. Vol. 28. P. 143–148.
6. The development of a microcontroller based smoked fish machine. URL: <https://www.researchgate.net/publication/379079989>.

Article sent: 24.05.2025

© Tsvirkun L.O.



UDC 519.7:697.245.7

MULTICRITERION OPTIMIZATION AT EVOLUTIONARY SEARCH FOR TUBULER GAS HEATERS

Dudkin K.V.*k.t.s.,*

ORCID: 0000-0001-5361-2981

Collective Research and Production Enterprise "Energocomplex",

Dnipro, Gagarina, 115, 49050

Irodov V.F.*d.t.s., prof.*

Dnipro Technological University "Step",

Dnipro, Yavornitskogo, 104, 49000

Abstract. The task of finding an optimal solution for a known binary fuzzy choice relation is considered. An iterative algorithm is used, in which the functions of generation and selection of solutions with several branches of the evolutionary search are successively implemented. The generation function is built, mostly, regardless of the content of the task. The selection function is built using a selection procedure, depending entirely on the problem being solved. The resulting information is used to guide the search process, making it understandable for guided machine learning.

Key words: tubular gas heaters, binary choice relations, multicriteria optimization

Introduction.

Solving multicriteria optimization problems requires the use of artificial intelligence methods. There is a significant number of works devoted to multicriteria optimization, for example [1,2]. These works develop the use of genetic algorithms and swarm optimization, which use a large number of modifications of these algorithms. At the same time, the use of universal approaches to solving optimization problems with binary choice relations, which is the subject of this report, has not received sufficient development.

Main text. Let us state the problem.

It is necessary to find a solution $x \in \Omega$ so that $xR_{s_1}y$ and for all $y \in \Omega$ and so that $xR_{s_1}y$ it is fulfilled $xR_{s_2}y$ and $xR_{s_3}y$. Let us create new binary relation R_{SSS} that takes into account limitation in the form of binary relation as follows:

$$xR_{SSS}y \equiv xR_{s_1}y \wedge xR_{s_2}y \wedge xR_{s_3}y \quad (1)$$

Let us represent the original choice relation (1) in the form



$$xR_{SSS}y \equiv xR_{SS}y \wedge xR_{S3} \quad (2)$$

where

$$xR_{SS}y \equiv xR_{S1}y \wedge xR_{S2} \quad (3)$$

It is this general case (3) of multicriteria optimization that is described in [3]. According to [3] the evolutionary search is represented in form

$$X_{jk} = S^{R_s}(G(X_{jk-1})), \quad k=1, 2, \dots, j=1, 2, \dots, N_b,$$

where $S^{R_s}(X)$ - selection function as blocking function

$$S^{R_s}(X) = \{x \in X | \forall y \in [X \setminus S^{R_s}(X)], \bar{y}R_s x\}$$

and X_{jk} – the set of selection solutions according to the binary choice relation R_s and choice function as blocking function at the iterate step k for the branch j of evolutionary search, N_b – the number of branches.

A numerical example of an evolutionary search using the boxing function is given in [3].

To jointly take into account binary choice (1), we present the evolutionary search algorithm in the form $X_{jk} = S_{R_{S3}}(S^{R_{SS}}(G(X_{jk-1}))), \quad k=1, 2, \dots, j=1, 2, \dots, N_b,$

It is this general case (2) following our previous studies it is considered here a problem of finding a solution $x_0 \in \Omega$ from elements $x = \{x^1, x^2, \dots, x^n\}$, so that $\forall x \in \Omega, x_0 R_s x$ where R_s - known binary relation that is a relation of non-strict preference.

We will consider the decomposition

$$X_k = \bigcup_{j=1}^{N_b} X_{jk}, \quad X_{ik} \cap X_{jk} = \emptyset, \quad i \neq j$$

where X_{jk} – the set of preferred solutions according to the binary choice relation R_s at the iterate step k for the branch j of evolutionary search, N_b – the number of branches.

Evolutionary search looks like:

$$X_{jk} = S(G(X_{jk-1})), \quad j=1, N_b, \quad k=1, 2, \dots, \quad (4)$$

where $S(X)$ – function of choice in the form:



$$S(X) = \{x \in X \mid \forall y \in [X \setminus S(X)], xR_sy\}, \quad (5)$$

We shall assume that set $S(X)$ contains the concrete number of elements – N_s .

For subset $X, X \subset \Omega$ we denote the function of generation $G(X)$ in the form

$$G(X) = X \cup G_H(X),$$

$$G_H(X) = \{y \in \Omega \mid \exists x \in X, yR_Gx, \mu_{R_G}(x, y) > 0\}, \quad (6)$$

R_G – relation R_G with attachment function $\mu_{R_G}(x, y): \Omega \times \Omega \rightarrow [0, 1]$.

We shall assume that set $G(X)$ contains the concrete number of elements – N_E .

Let us denote as $R_s^+(x)$ - upper section according to the relation R_s of the set Ω .

$$R_s^+(x) = \{y \in \Omega \mid yR_sx\}. \quad (7)$$

Statement 1. If $R_s^+(x)$ – upper section according to the relation R_s have the property:

$$\forall x \neq x_0, \text{mes}R_s^+(x) > 0,$$

where x_0 – is R_s -optimal solution at the set Ω ,

and the function of generation satisfies a requirement if $x_H \in G_H(X)$ then

$$\forall x \neq x_0, P\{x_H \in R_s^+(x)\} \geq \delta > 0,$$

in this case for any $x \in \Omega, x \neq x_0$, there is a number K that for any $k \geq K$ and for all branches of the search $j = \overline{1, N_b}$ with probability 1 a requirement will be met $x_{jk} \subset R_s^+(x)$, that proves convergence of the iteration process (4) with the probability that equals 1 to an R_s -optimal decision for all branches of evolutionary search $j = \overline{1, N_b}$.

If relation (3) is the relation is a no strictly order relation, than the evolutionary search is represented in form $X_{jk} = S_{R_{s1}}(S_{R_{s2}}(G(X_{jk-1}))), j = 1, 2, \dots, N_B, k = 1, 2, \dots$

A specific application of the presented multicriteria optimization approach is mathematical modeling of the operation of a pellet burner for a tubular gas heater [4]. As a result of the experimental study, regression dependencies were obtained for three output parameters YA, YCO, YNOx depending on three dimensionless input



parameters. Using the methods of the theory of dimension and similarity, the modeling problem can be reduced to the modeling of 5 dimensionless parameters (complexes):

$$\Pi_1 = S_p / S, \Pi_2 = L_p / L, \Pi_3 = W / Y_A / (L / S)^2, \Pi_4 = (\alpha_{CO})^{0.5}, \Pi_5 = (\alpha_{NO_x})^{0.5}.$$

Regression dependencies in dimensionless form have the form:

$$\phi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 0, \Pi_4 = \psi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3), \Pi_5 = \eta(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3).$$

The obtained dependencies for the output functions make it possible to solve problems of optimization of input parameters. Of course, it is of interest to provide conditions

$$\Pi_4 \rightarrow \min, \Pi_5 \rightarrow \min, Y_A \rightarrow \min. \quad (8)$$

Conditions (8) correspond to the formulation of the multicriteria optimization problem (1) and can be solved using the described approach. Numerical solutions of algorithm (4) showed fairly good performance of the evolutionary search.

Summary and conclusions.

Algorithms for finding solutions with multiple binary relations have been considered. Two approaches to solving multicriteria optimization problems have been developed: 1- construction of the integral binary choice relation, which is based on the initial binary choice relations; 2 - realization of the solution search procedure in the form of sequential selection, first by the first binary choice relation, and then by the second binary choice relation from those solutions that passed the first selection. The above approaches are useful for parametric optimization of tubular gas heaters.

The results of the calculations prove that the algorithm of evolutionary search has a sufficiently good performance in solving problems of fuzzy modeling of tubular gas heaters.

References:

1. Peng, F.; Lv, L.; Chen, W.; Wang, J. (2023) A Projection-Based Evolutionary Algorithm for Multi-Objective and Many-Objective Optimization. Processes 2023, 11, 1564. <https://doi.org/10.3390/pr11051564>



2. Behmanesh, R.; Rahimi, I.; Gandomi, A.H. (2021) Evolutionary Many-Objective Algorithms for Combinatorial Optimization Problems: A Comparative Study. Arch. Comput. Methods Eng., 28, 673–688. <http://hdl.handle.net/10453/145731>

3. Irodov V. F., Chornomorets G.Y. and Barsuk R.V. (2020) Multiobjective Optimization at Evolutionary Search with Binary Choice Relation. Cybernetics and Systems Analysis, No 56(3) – P.449–454. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00260-7>

4. Irodov V.F., R. V Barsuk R.V., Chornomorets G.Ya. (2021) Experimental Simulation and Multiobjective Optimization of the Work of a Pellet Burner for a Tubular Gas Heater Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – vol. 94 – P.227–233. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02290-0>.

*The article was prepared as part of the
Scientific and technical work 0122U200712 Mathematical modeling and
multi-criteria optimization of pipeline energy systems*

Article sent: 25.05.2025

© Dudkin K.V.



УДК 004.5

A CONCEPTUAL MODEL FOR BALANCE BETWEEN SECURITY AND USABILITY IN SOFTWARE

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ДЛЯ БАЛАНСУ МІЖ БЕЗПЕКОЮ ТА ЗРУЧНІСТЮ ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Krykhivskyi M.V. / Крихівський М.В.

c.t.s., assoc. prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0009-0000-3285-4308

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Ivano-Frankivsk, Karpatska, 15, 76019Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, 76019

Анотація. В статті представлено концепцію динамічної моделі багаторівневої автентифікації (DMAA), яка пропонує інноваційний підхід до забезпечення безпеки користувачів у цифровому середовищі. Автор досліджує проблеми традиційних методів автентифікації, що часто вимагають компромісу між рівнем захисту та зручністю використання. Запропонована модель базується на поєднанні поведінкового аналізу користувача, контекстної оцінки ризиків, адаптивної багаторівневої перевірки та механізмів інтерактивного навчання для створення персоналізованої системи автентифікації.

DMAA використовує нейронні мережі для аналізу поведінкових патернів, таких як динаміка введення пароля, характерні рухи миші та стиль взаємодії з інтерфейсом. На основі отриманих даних система формує детальний профіль користувача і застосовує алгоритми машинного навчання для виявлення аномалій, що можуть сигналізувати про потенційні загрози. Важливим аспектом моделі є контекстна оцінка ризиків, яка враховує змінні параметри, такі як місцезнаходження, тип пристрою, мережеві умови та час доби. Використання Байєсівських мереж і Марковських процесів дозволяє прогнозувати ймовірність загроз на основі аналізу послідовності дій користувача.

Особливістю моделі є персоналізований рівень захисту, який динамічно коригується залежно від оціненого рівня ризику. У разі виявлення аномальних дій або збільшення ймовірності загрози система може автоматично змінювати спосіб автентифікації, наприклад, переходячи від стандартного входу з паролем до багатофакторної автентифікації із залученням біометричних даних. Крім того, застосування генетичних алгоритмів дозволяє оптимізувати параметри безпеки для зменшення кількості хибних спрацьовувань.

DMAA також має механізм інтерактивного адаптивного навчання, що покращує точність розпізнавання користувачів на основі історичних даних. Це дозволяє системі ефективніше реагувати на зміну поведінки користувача, мінімізуючи ризики та підвищуючи загальний рівень захисту. Нечітка логіка використовується для аналізу ситуацій із невизначеними ризиками, що сприяє гнучкому підходу до автентифікації без надмірної жорсткості системи. Крім того, важливим компонентом є зворотний зв'язок із користувачем, який дозволяє інформувати його про потенційні загрози та рекомендувати додаткові заходи безпеки.

Запропонована динамічна модель багаторівневої автентифікації є значним кроком у розвитку систем захисту цифрових платформ, оскільки поєднує високий рівень безпеки з комфортною взаємодією користувача. Її впровадження дозволить значно зменшити ризики несанкціонованого доступу, зберігаючи водночас високу ефективність та зручність



використання. Ця модель буде корисною для розробників програмного забезпечення, спеціалістів із кібербезпеки та аналітиків UX-дизайну, які прагнуть створити більш захищені та гнучкі системи автентифікації.

Ключові слова: інформаційна безпека, зручність програмного забезпечення, динамічна модель, автентифікація.

Вступ.

Сучасні тенденції в кібербезпеці значно впливають на процес створення програмного забезпечення (ПЗ), яке має бути зручним та доступним для всіх користувачів (юзабіліті) та надавати простоту навігації, швидке завантаження сторінок, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Тому виникають нові завдання, оскільки розробники прагнуть знайти баланс між захистом даних і зручністю використання.

Однією з ключових тенденцій є зростання використання штучного інтелекту (ШІ) для аналізу поведінки користувачів. Ці системи дозволяють виявляти аномалії в режимі реального часу, що може свідчити про потенційні загрози. Водночас, такі технології можуть адаптувати рівень безпеки залежно від поведінки користувача, знижуючи бар'єри для звичайних дій і посилюючи захист у разі підозрілої активності.

Іншою важливою тенденцією є впровадження багатфакторної автентифікації, яка стає стандартом для багатьох додатків. Хоча це підвищує рівень безпеки, водночас також можуть створюватись певні незручності для користувачів, якщо процес автентифікації не є інтуїтивно зрозумілим. Для вирішення цієї проблеми розробники активно працюють над спрощенням таких процесів, наприклад, через використання біометричних даних або одноразових кодів.

Зростання популярності хмарних технологій також впливає на кібербезпеку та юзабіліті. Хмарні сервіси забезпечують високий рівень захисту даних, але водночас вимагають від користувачів розуміння принципів безпечного доступу. Це стимулює розробку інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів, які допомагають користувачам легко орієнтуватися в налаштуваннях безпеки.

Крім того, дедалі більше уваги приділяється захисту конфіденційності даних. Нові регуляторні вимоги, такі як GDPR, змушують компанії



впроваджувати прозорі механізми збору та обробки даних. Це впливає на дизайн додатків, оскільки користувачі повинні мати змогу легко керувати своїми даними, що вимагає створення зручних і зрозумілих інструментів.

Загалом, сучасні тенденції в кібербезпеці спрямовані на інтеграцію передових технологій, які забезпечують високий рівень захисту, не жертвуючи зручністю використання. Це створює нові виклики для розробників, але водночас відкриває можливості для інновацій у дизайні та функціональності додатків.

Основний текст.

Рекомендації щодо засобів контролю інформаційної безпеки, кібербезпеки та захисту конфіденційності надає міжнародний стандарт ISO/IEC 27002:2022 [1]. Його основною метою є допомога організаціям впроваджувати надійні механізми безпеки, які не лише захищають дані, але й сприяють зручності користувачів. Це особливо важливо у контексті розробки програмного забезпечення, де необхідно знайти баланс між строгими заходами кіберзахисту та комфортним користувацьким досвідом. Стандарт охоплює такі аспекти, як управління доступом, криптографія, безпека персоналу, реагування на інциденти та захист комунікацій.

Міжнародним стандартом, який визначає основні принципи зручності (юзабіліті) та його застосування в інтерактивних системах є ISO 9241-11:2018 Ергономіка взаємодії людина-система [2]. Він пояснює, що юзабіліті – це не просто характеристика продукту, а результат його використання в конкретному контексті. Стандарт надає визначення ключових термінів, таких як ефективність, продуктивність та задоволеність користувача, і пояснює, як ці фактори впливають на загальну якість взаємодії.

ISO 9241-11:2018 допомагає розробникам, дизайнерам та організаціям оцінювати юзабіліті своїх продуктів, враховуючи реальні умови використання. Він не містить конкретних методів розробки, але пропонує загальну концепцію, яка може бути застосована до різних типів систем, включаючи програмне забезпечення, веб-додатки та фізичні пристрої. Цей стандарт є важливим для забезпечення зручності користувачів, оскільки він дозволяє компаніям



створювати продукти, які не лише відповідають технічним вимогам, а й забезпечують комфортну та ефективну взаємодію. Він був підтверджений у 2023 році, що свідчить про його актуальність у сучасному цифровому середовищі.

Фундаментом для багатьох досліджень, що окреслює основні принципи впровадження заходів безпеки у життєвий цикл розробки інформаційних систем слугує робота [2]. Вона присвячена компонентам інформаційної безпеки життєвого циклу розробки системи (SDLC) Зокрема, розглядаються стратегії для зменшення ризиків, пов'язаних із загрозами, при цьому підкреслюється важливість інтеграції заходів безпеки ще на етапі формування вимог. Це дозволяє будувати системи, що відповідають жорстким вимогам безпеки, але розроблені з урахуванням зручності для користувачів і доступності.

Авторами роботи [3], що опублікована Національним інститутом стандартів і технологій (NIST), розглядається важливість інтеграції заходів безпеки на всіх етапах життєвого циклу розробки системи. Вони наголошують, що безпека повинна бути невід'ємною частиною процесу, починаючи з ініціації проєкту, аналізу вимог, проєктування, реалізації, тестування та експлуатації. Підкреслюється необхідність врахування ризиків та впровадження відповідних механізмів захисту ще на ранніх стадіях розробки, що дозволяє зменшити витрати на усунення вразливостей у майбутньому.

Документ також визначає ключові ролі та відповідальність учасників процесу, включаючи розробників, адміністраторів та керівників проєктів, які повинні забезпечувати відповідність системи вимогам безпеки. Особливу увагу приділено питанням управління ризиками, оцінці загроз та вибору відповідних заходів захисту. Робота містить рекомендації щодо застосування стандартів безпеки та методологій, які допомагають організаціям ефективно інтегрувати безпеку у свої процеси розробки.

У оглядовій статті [4] досліджені публікації про інтеграцію безпекових вимог в розробку програмного забезпечення Розглянуті методи або моделі, що придатні для інтеграції безпеки на всіх або деяких фазах життєвого циклу розробки програмного забезпечення, та досліджено, які з них найбільше



розглядаються або ігноруються. Автори зробили огляд для початку створення методології, яка інтегруватиме методи безпеки в гнучку розробку програмного забезпечення, що дозволить недосвідченим розробникам створювати більш безпечні програми. Вони виділяють новий безпечний життєвий цикл розробки програмного забезпечення (S-SDLC), який вирішує питання безпеки під час розробки програмного забезпечення; модель зрілості безпеки програмного забезпечення (SAMM), що є відкритою методологією, яка дозволяє реалізацію стратегії покращення безпеки програмного забезпечення; процес життєвого циклу розробки безпечного програмного забезпечення Макгроу (McGraw SDLC), який передбачає сім точок дотику; правильність за конструкцією (CbyC) є методологією, яка спрямована на мінімізацію рівня дефектів і підвищення стійкості до змін; модель ViewNext, що є гнучкою адаптацією S-SDLC, яка включає в себе найкращі методи безпеки з відомих моделей разом з іншими завданнями безпеки, заснованими на спіральній моделі, інтегровані в звичайні життєві цикли розробки програмного забезпечення; Microsoft SDL Agile, що є адаптація методології SDL (Security Development Lifecycle), яка зосереджена на інтеграції безпеки в кожен ітерацію процесу гнучкої розробки програмного забезпечення; модель зрілості безпеки Building Security In Maturity Model (BSIMM), яка використовується для опису практик і процесів провідними організаціями безпеки програмного забезпечення для розробки, вдосконалення та підтримки ефективних програм безпеки програмного забезпечення. BSIMM зосереджується на оцінці програм безпеки програмного забезпечення організацій шляхом вимірювання їх зрілості за 12 поширеними методами безпеки.

У дослідженні [5] розглядаються сценарії атак, які можуть вплинути на безпеку програмного забезпечення. Автор наголошує, що компанії повинні не лише впроваджувати DevSecOps, а й активно захищати свої конвеєри розробки від потенційних атак. Він в результаті аналізу загроз, пов'язаних з використанням DevSecOps, доводить, що сам факт впровадження DevSecOps не гарантує безпеку.



Досягнення балансу між кібербезпекою та юзабіліті вимагає комплексного підходу, що враховує як технічні, так і поведінкові аспекти взаємодії користувачів із системами. Одним із ключових підходів є використання адаптивної автентифікації, яка змінює рівень перевірки залежно від контексту.

У концептуальній моделі пропонується застосовувати кілька математичних моделей. **Динамічна модель багаторівневої автентифікації (DMAA):**

1. Поведінковий аналіз користувача

- Використання нейронних мереж для аналізу патернів поведінки (динаміка введення пароля, рухи миші, взаємодія з інтерфейсом).
- Машинне навчання для побудови профілю користувача та розпізнавання аномалій.
- Збір даних у режимі реального часу для аналізу стилю роботи користувача.

2. Контекстна оцінка ризиків

- Врахування факторів, таких як місцезнаходження, пристрій, мережеві умови, час доби.
- Байєсівські мережі для прогнозування ймовірності ризику.
- Використання Марковських процесів для аналізу послідовності дій користувача.

3. Персоналізований рівень захисту

- Динамічне коригування рівня автентифікації: від однофакторної до багатфакторної автентифікації залежно від рівня ризику.
- Використання біометричних даних (відбитки пальців, розпізнавання обличчя) при виявленні потенційної загрози.
- Генетичні алгоритми для оптимізації параметрів захисту.

4. Інтерактивна адаптація

- Система самонавчання та покращення точності на основі історичних даних.
- Використання нечіткої логіки для аналізу ситуацій з невизначеними ризиками.



- Зворотний зв'язок із користувачем (наприклад, повідомлення про потенційні загрози).

Ця модель дозволяє створити гнучку та адаптивну систему, яка враховує індивідуальні особливості, поточний контекст та динамічно налаштовує рівень захисту без надмірного ускладнення процесу автентифікації.

Висновки.

У дослідженні представлено концептуальну модель, яка спрямована на досягнення оптимального балансу між безпекою та зручністю програмного забезпечення. Вона враховує ключові аспекти взаємодії користувача з програмним забезпеченням, аналізує ризики та пропонує оптимізовані рішення для гармонійного поєднання безпекових заходів і зручності використання. Основні принципи моделі ґрунтуються на адаптивності та гнучкості, що дозволяє регулювати рівень захисту відповідно до потреб і контексту використання. Окрім цього, модель сприяє розробці інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів і мінімізації бар'єрів у взаємодії користувача із захисними механізмами. Запропонований підхід може слугувати основою для подальших досліджень у сфері кібербезпеки та розробки програмних продуктів із більшою орієнтацією на баланс між захистом і зручністю. У перспективі це сприятиме підвищенню рівня довіри користувачів до програмного забезпечення, забезпечуючи його ефективність та безпеку без зайвого ускладнення.

Література.

1. ISO/IEC 27002:2022 Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security controls. URL: <https://www.iso.org/standard/75652.html#lifecycle>
2. ISO 9241-11:2018 Ergonomics of human-system interaction. URL: <https://www.iso.org/standard/63500.html>
3. Kissel R., Stine R., Scholl M., Rossman H., Fahlsing J., Gulick J. Security Considerations in the System Development Life Cycle. NIST, 2019. С. 44. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-64r2>



4. Valdés-Rodríguez Y., Hochstetter-Diez J., Díaz-Arancibia J., Cadena-Martínez R. Towards the Integration of Security Practices in Agile Software Development: A Systematic Mapping Review. MDPI 13(7) 4578, 2023. URL: <https://doi.org/10.3390/app13074578>

5. Pecka N. S. Making Secure Software Insecure without Changing Its Code: The Possibilities and Impacts of Attacks on the DevOps Pipeline. Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, IA, USA, 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.12879>

Abstract. *The article presents the concept of a Dynamic Multi-Level Authentication Model (DMAA), which offers an innovative approach to ensuring user security in a digital environment. The author explores the challenges of traditional authentication methods, which often require a compromise between security levels and ease of use. The proposed model is based on a combination of user behavior analysis, contextual risk assessment, adaptive multi-level verification, and interactive learning mechanisms to create a personalized authentication system.*

DMAA utilizes neural networks to analyze behavioral patterns such as password entry dynamics, characteristic mouse movements, and interaction style with the interface. Based on the obtained data, the system creates a detailed user profile and applies machine learning algorithms to detect anomalies that may signal potential threats. An essential aspect of the model is contextual risk assessment, which considers variable parameters such as location, device type, network conditions, and time of day. The use of Bayesian networks and Markov processes enables the prediction of threat probability based on the analysis of the user's action sequence.

A distinctive feature of the model is its personalized security level, which dynamically adjusts based on the assessed risk level. If abnormal actions are detected or the probability of a threat increases, the system can automatically modify the authentication method, for example, shifting from standard password login to multi-factor authentication with biometric data. Additionally, the use of genetic algorithms helps optimize security parameters to reduce the number of false positives.

DMAA also features an interactive adaptive learning mechanism that enhances the accuracy of user recognition based on historical data. This enables the system to respond more effectively to changes in user behavior, minimizing risks and improving overall security levels. Fuzzy logic is used to analyze situations with uncertain risks, allowing for a flexible authentication approach without excessive system rigidity. Additionally, an important component is user feedback, which helps inform users about potential threats and recommends additional security measures.

The proposed dynamic multi-level authentication model represents a significant advancement in the protection of digital platforms, as it combines a high level of security with a seamless user experience. Its implementation will substantially reduce the risks of unauthorized access while maintaining high efficiency and usability. This model will be valuable for software developers, cybersecurity specialists, and UX design analysts striving to create more secure and flexible authentication systems.

Key words: *information security, software usability, dynamic model, authentication.*

Статья отправлена: 02.05.2025 г.

© Крихівський М.В.



UDC 004.732

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ENERGY EFFICIENT ETHERNET (EEE) TECHNOLOGY IN ETHERNET NETWORKS

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ENERGY EFFICIENT ETHERNET (EEE) В ETHERNET-МЕРЕЖАХ

Nesterenko S. A. / Нестеренко С. А.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0002-3757-6594

Alokhin A. O. / Альохін А. О.

master's degree / магістр

ORCID: 0009-0000-9591-0012

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Shevchenko Ave 1, 65044

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, пр. Шевченка 1, 65044

Abstract. The energy efficiency features of the Energy Efficient Ethernet (EEE) technology and the impact of transitions to the low power idle mode with subsequent return to the active state on the frame transmission time of an Ethernet channel in EEE mode at different transmission rates depending on the channel utilization are investigated. The operating parameters of the IEEE 802.3az standard for various transmission rates are presented, as well as analytical expressions for calculating the power consumption of the channel and the average frame transaction time in EEE mode. Based on the calculations, graphs are constructed showing the power consumption of the port in different operating modes and the average frame transaction time depending on the channel utilization at different transmission rates. Conclusions are drawn regarding the impact of the energy-saving mode on key performance indicators of modern Ethernet networks.

Key words: Industry 5.0, Energy Efficient Ethernet (EEE), IEEE 802.3az standard, Green Ethernet, channel utilization, power consumption, frame transaction time, mathematical models.

Introduction.

The concept of Industry 5.0 focuses on the creation of intelligent and sustainable systems in which energy consumption optimization plays an important role. In this context, Green Ethernet technology becomes one of the key tools for reducing the energy costs of network equipment, which accounts for more than 10% of the total energy consumption of information systems [1]. The design and reengineering of computer networks using energy-efficient solutions contributes not only to reducing the environmental footprint but also to increasing the economic efficiency of the infrastructure within the framework of the Industry 5.0 concept.

To reduce the energy consumption of Ethernet networks, the IEEE 802.3az standard (Energy Efficient Ethernet, EEE) was developed [2]. When evaluating energy



efficiency in EEE mode, it is necessary to take into account the operating parameters of the standard, which depend on the data transmission rate in the Ethernet channel and the time required to transition from the active state to the Low Power Idle (LPI) mode and back. These parameters determine the power consumption in the active mode and low power mode, as well as the temporal characteristics of the transitions between these states and the frame transaction time in the channel.

Presentation of the main material.

Typical parameter values of IEEE 802.3az operation for various data transmission rates are presented in Table 1 [3].

Table 1 – Operating parameters of the IEEE 802.3az standard for various data transmission rates

Parameter	100Base-TX	1000Base-T	10GBase-T
Time to transition to Sleep state, μs	200	182	2.88
Time to transition to Wake state, μs	30.5	16.5	4.48
Power consumption in Active state, mW	200	600	4000
Power consumption in LPI state, mW	20	60	400

The expression for the power consumed by a port in the standard operating mode of the IEEE 802.3 standard (P_s), taking into account that the power consumed in the idle state is approximately equal to the power consumed in the active state, can be written as:

$$P_s = P_A, \quad (1)$$

where P_A is the power consumed by the port in the active state.

The power consumed by the port in EEE mode depends on the proportion of time the interface spends in each of its possible states [4]:

$$P = \rho_{off}P_{LPI} + \rho_{tra}P_A + \rho_{on}P_A, \quad (2)$$



where ρ_{off} is the proportion of time the interface operates in the low power mode, ρ_{tra} is the proportion of time spent in the transition state between modes, ρ_{on} is the proportion of time in the active mode, and P_{LPI} is the power consumed in the low power mode.

The average time that a port spends in LPI mode before the arrival of the next frame, assuming an exponential distribution of inter-arrival times, is determined by the following expression:

$$T_{off} = \frac{e^{-\lambda t_s}}{\lambda}, \quad (3)$$

where λ is the frame arrival rate, t_s is the time required to switch the channel from the active state to the low power state.

The average time during which the port transmits frames after transitioning to the active mode, before returning to the LPI mode, is given by the following expression:

$$T_{on} = \frac{U}{1-U} \left(t_s + t_w + \frac{e^{-\lambda t_s}}{\lambda} \right), \quad (4)$$

where U is the channel utilization, t_w is the time required to switch the channel from the low power state to the active state.

While the channel is in the active state, it transmits frames from the queue. Therefore, the proportion of time it operates in the active mode corresponds to the channel utilization:

$$\rho_{on} = \frac{T_{on}}{T_{off} + T_{on} + t_s + t_w} = U. \quad (5)$$

Proportion of time the port operates in the LPI state:

$$\rho_{off} = \frac{T_{off}}{T_{off} + T_{on} + t_s + t_w}. \quad (6)$$

Proportion of time the port operates in transition states:

$$\rho_{tra} = \frac{t_s + t_w}{T_{off} + T_{on} + t_s + t_w}. \quad (7)$$

Expressions (1) – (7) represent a mathematical model of the power consumption of an Ethernet channel in EEE mode. Based on these expressions and the data from table 1, calculations were performed, and the results are presented as graphs of the



power consumed by the switch port for various data transmission rates (figure 1) – (figure 3).

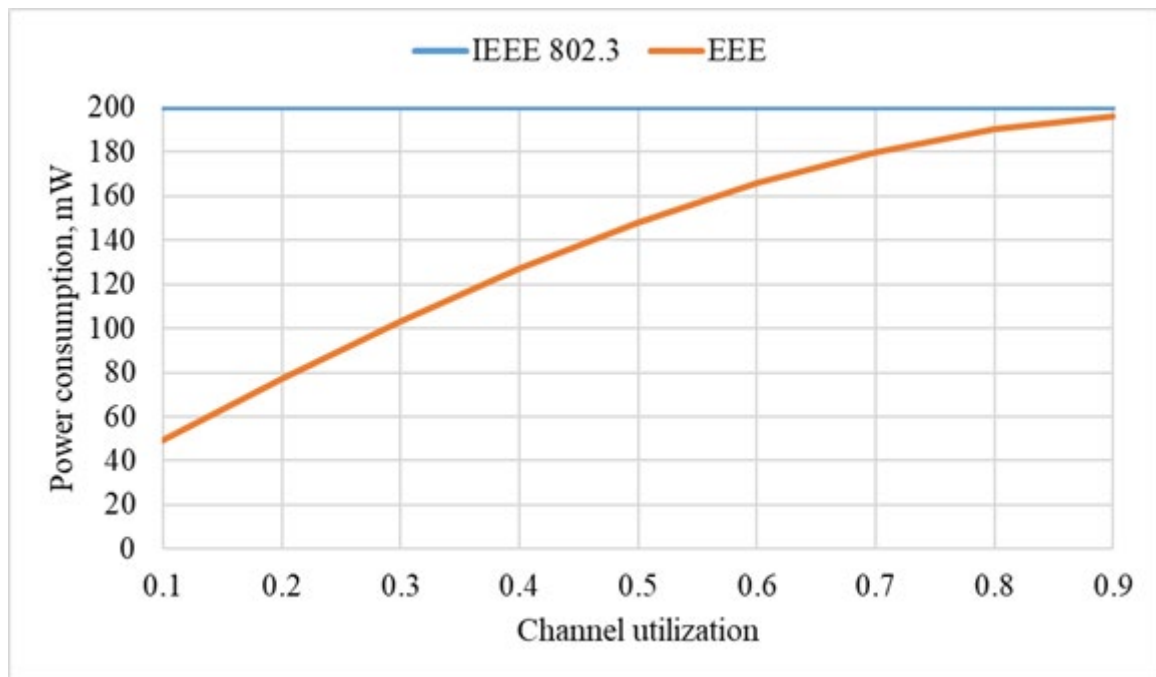


Figure 1 – Power consumed by the port in different operating modes for the 100Base-TX standard depending on channel utilization.

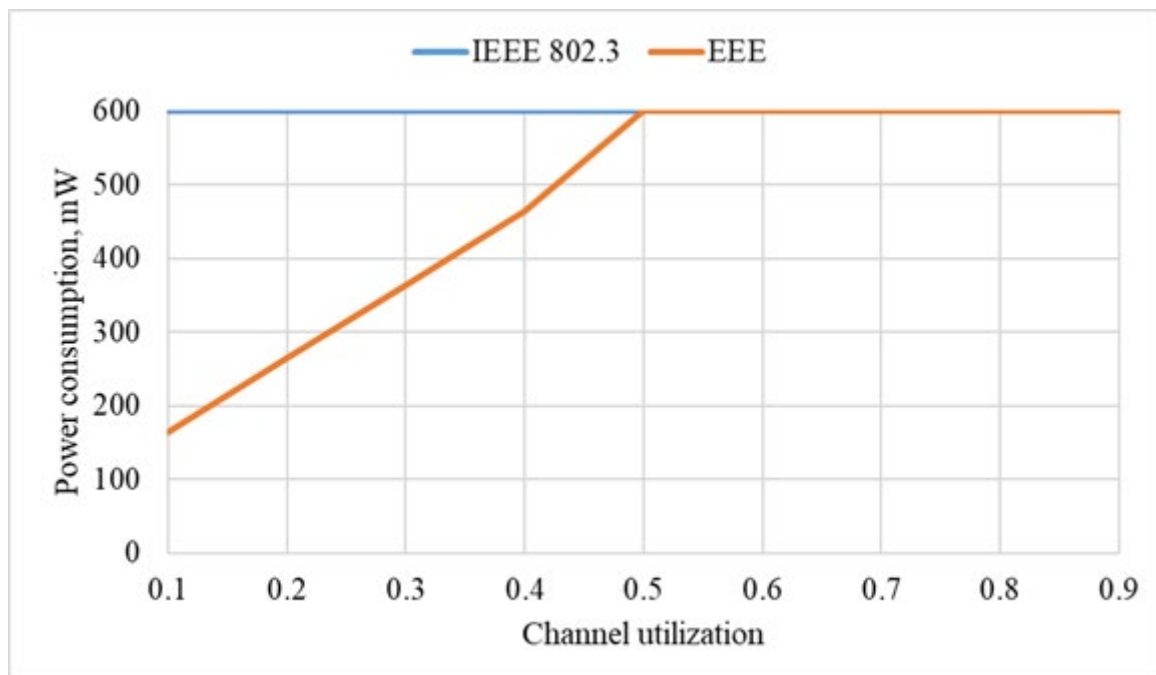


Figure 2 – Power consumed by the port in different operating modes for the 1000Base-T standard depending on channel utilization.

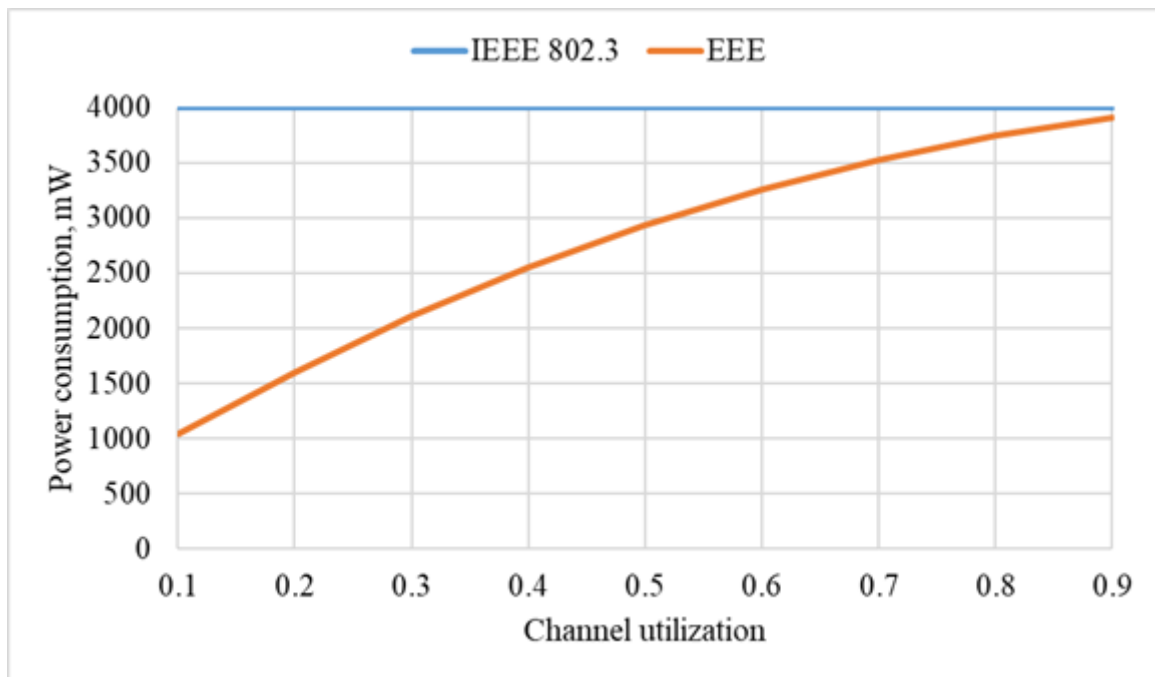


Figure 3 – Power consumed by the port in different operating modes for the 10GBase-T standard depending on channel utilization.

The presence of transition phases between states in EEE technology leads to an increase in frame transaction time.

The average frame transaction time is defined as [5]:

$$T_{tr}^{avg} = \rho_{on} \cdot T_{tr}^{min} + \rho_{off} \cdot (T_{tr}^{min} + t_s + t_w) + \rho_{tra} \cdot (T_{tr}^{min} + t_s), \quad (8)$$

where T_{tr}^{min} – minimum frame transmission time:

$$T_{tr}^{min} = \frac{L_s + L_p}{V_c}, \quad (9)$$

where L_s is the frame size in bits, $L_p = 96$ bits is the minimum interframe gap according to the IEEE 802.3 standard, and V_c is the bit rate in the physical communication channel.

Similarly, the calculations of the average frame transaction time were performed based on expressions (3) – (9). The calculation results are presented as graphs showing the dependence of the frame transaction time on channel utilization for various data transmission rates (figure 4) – (figure 6).

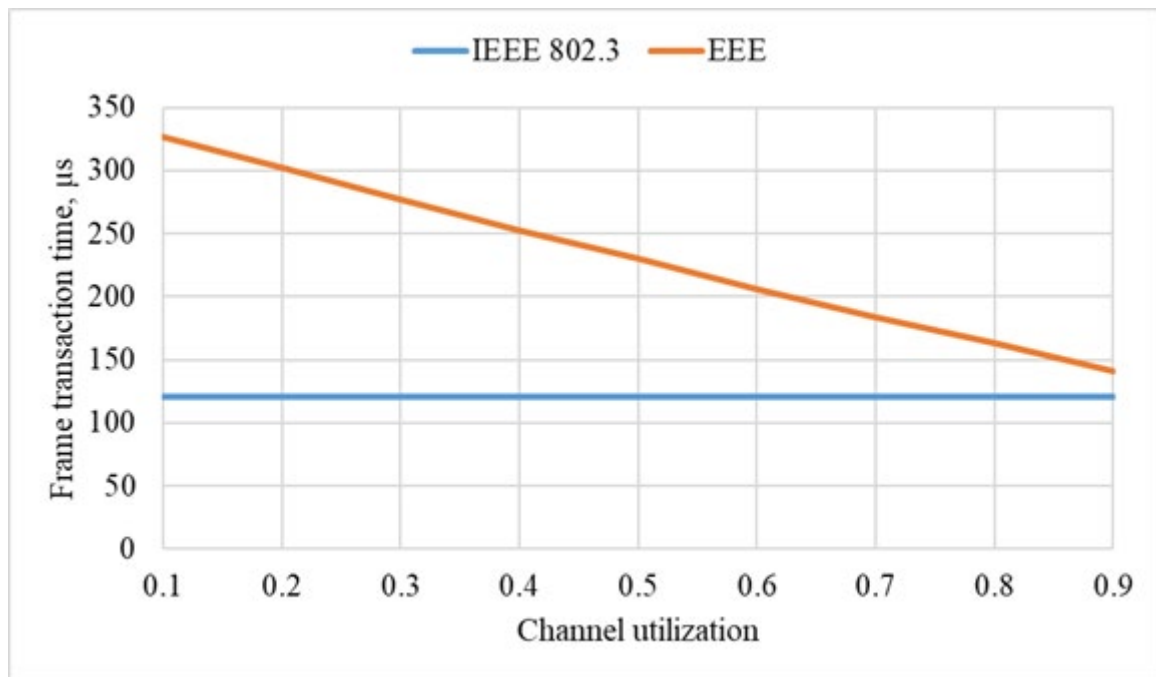


Figure 4 – Frame transaction time (1500 bytes) depending on channel utilization in different operating modes for the 100Base-TX standard.

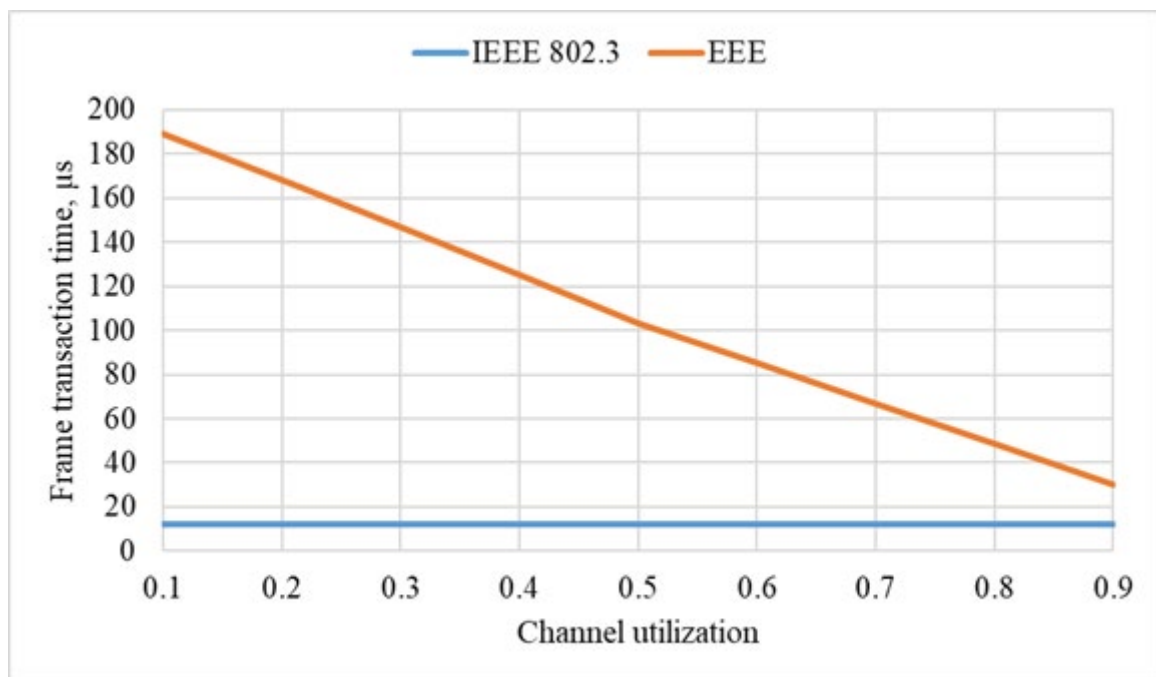


Figure 5 – Frame transaction time (1500 bytes) depending on channel utilization in different operating modes for the 1000Base-T standard.

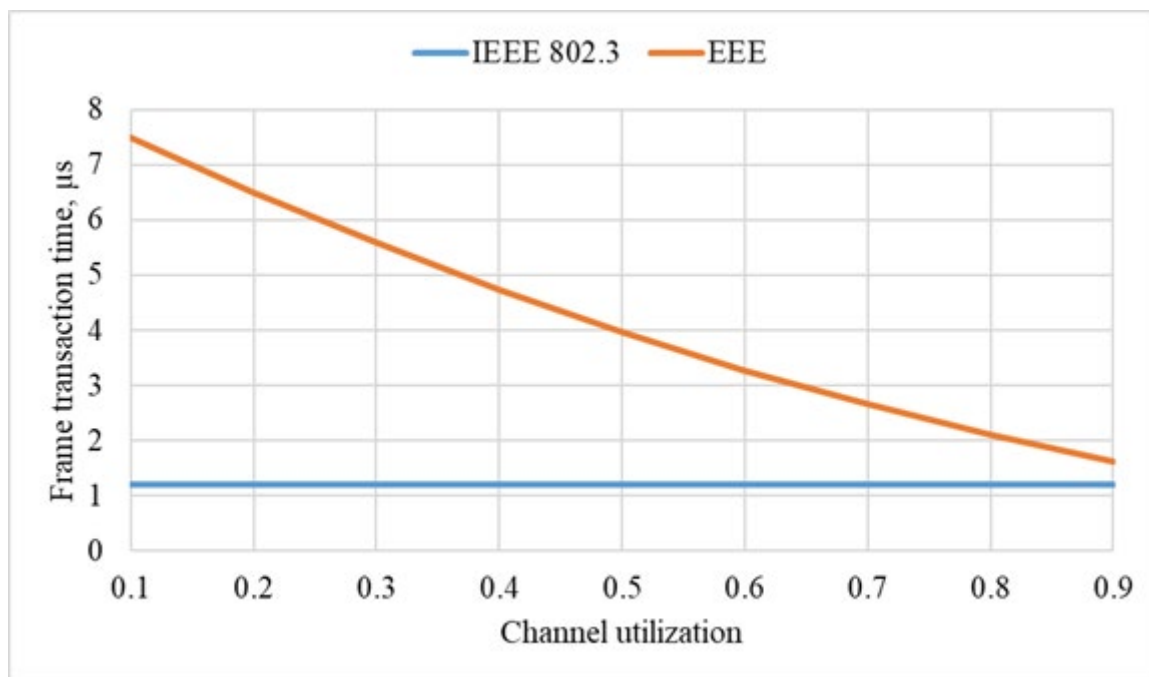


Figure 6 – Frame transaction time (1500 bytes) depending on channel utilization in different operating modes for the 10GBase-T standard.

Conclusions.

The analysis of the presented graphs shows that the use of EEE mode at a data transmission rate of 1000 Mbps becomes impractical when channel utilization exceeds 50%, since the power consumption is almost the same as in the standard operating mode, while the average frame transaction time increases significantly compared to the standard mode, leading to a substantial decrease in channel throughput. This is due to the relatively large timing parameters of the IEEE 802.3az standard compared to other data transmission rates. When channel utilization exceeds 50%, the port spends a significant portion of time in transitional states between the active and energy-saving modes, as a result of which the channel almost never enters the LPI mode.

For transmission rates of 100 Mbps and 10000 Mbps, the transition times between the active and LPI states are negligible relative to the frame transmission time, which makes it possible to reduce power consumption across the entire range of channel utilization, with the energy-saving effect being most significant at low channel utilization levels.



Consequently, when designing networks using EEE, it is important to consider not only the data transmission rate but also the level of network load in order to achieve the best trade-off between energy savings and performance.

References.

1. Szilágyi L., Cinkler T., Csernátó Z. Energy-Efficient Networking: An Overview // Acta Universitatis Sapientiae. Electrical and Mechanical Engineering, 2010. – Vol. 2. – P. 99-113. URL: <https://acta.sapientia.ro/content/docs/-energy-efficient-networking-an-overview.pdf>.
2. IEEE Std 802.3az-2010 (Amendment to IEEE Std 802.3-2008). Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 5: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Energy-Efficient Ethernet. IEEE Standards Association, 2010.
3. Reviriego P., Maestro J. A., Hernández J. A., Larrabeiti D. Study of the potential energy savings in Ethernet by combining Energy Efficient Ethernet and Adaptive Link Rate // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2012. – Vol. 23, № 3. – P. 227-233. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.1526>.
4. Herrería-Alonso S., Rodríguez-Pérez M., Fernández-Veiga M., López-García C. How efficient is energy-efficient Ethernet? // Proceedings of the 3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2011). Budapest, Hungary, 2011. – P. 1-7. URL: https://www.researchgate.net/publication/221003554_How_efficient_is_energy-efficient_ethernet.
5. Nesterenko S. A., Alokhin A. O. Дослідження часу транзакції кадрів в Ethernet-мережах з технологією Energy Efficient Ethernet (EEE) [Investigation of frame transaction time in Ethernet networks using Energy Efficient Ethernet (EEE) technology] // Science in the modern world: innovations and challenges. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference. Perfect Publishing. Toronto, Canada. 2025. Pp. 192-196. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo->



praktichna-konferentsiya-science-in-the-modern-world-innovations-and-challenges-
20-22-02-2025-toronto-kanada-arhiv/

Анотація. Досліджено особливості енергоефективності технології Energy Efficient Ethernet (EEE) та вплив переходів до режиму зниженого енергоспоживання з подальшим поверненням до активного стану на час передавання кадрів в каналі Ethernet у режимі EEE за різних швидкостей передавання даних залежно від завантаження каналу. Наведено параметри роботи стандарту IEEE 802.3az для різних швидкостей передавання, а також аналітичні вирази для розрахунку споживаної потужності каналу та середнього часу транзакції кадру в режимі EEE. На основі розрахунків побудовано графіки споживаної потужності порту в різних режимах роботи та середнього часу транзакції кадру залежно від завантаження каналу за різних швидкостей передавання. Зроблено висновки щодо впливу енергозберігаючого режиму на ключові показники продуктивності сучасних Ethernet-мереж.

Ключові слова: Індустрія 5.0, Energy Efficient Ethernet (EEE), стандарт IEEE 802.3az, Green Ethernet, завантаження каналу, енергоспоживання, час транзакції кадру, математичні моделі.

Статтю надіслано: 18.05.2025

© Нестеренко С. А., Альохін А. О.



УДК 004.42.; 378.147.; 004.94

DEVELOPMENT OF A MOBILE APPLICATION FOR REMINDER ABOUT TAKING MEDICINES

РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО ДОДАТКА ДЛЯ НАГАДУВАННЯ ПРО ПРИЙМАННЯ ЛІКІВ

Altukhova T. V. / Алтухова Т.В.

с.т.с. / к.т.н.

ORCID: 0000-0002-8255-5725

Donetsk National Technical University, Drohobych, Sambirsk, 76, 82111

Донецький національний технічний університет, м. Дрогобич, Самбірська, 76, 82111

Sergienko L. H. / Сергієнко Л. Г.

с.р.с., ас.проф. / к.пед.н., доц.

ORCID: 0000-0001-8668-7736

Donetsk National Technical University, Drohobych, Sambirsk, 76, 82111

Донецький національний технічний університет, м. Дрогобич, Самбірська, 76, 82111

Sergienko O. O. / Сергієнко О. О.

student / студент гр.ПЗм-11,

ORCID: 0009-0005-6309-5814

Lutsk National Technical University, Lutsk, Lvivska, 75, 43018

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Львівська, 75, 43018

Анотація. В статті розглядається питання розробки зручного та функціонального мобільного застосунку, що забезпечує управління нагадуваннями про своєчасне приймання ліків. Розглянуто основні аспекти предметної області, обґрунтовано вибір технологій, реалізовано функціонал додатка та проведено його тестування. Це дозволяє не лише продемонструвати досягнутий результат, а й надати рекомендації для подальшого вдосконалення продукту. В процесі проектування застосовувалися широко використовувані технології, зокрема, мова програмування Kotlin, фреймворк Jetpack Compose для створення інтерфейсу користувача з використанням Material Design 3, Jetpack Compose Navigation для організації навігації, а також ORM Room для роботи з базою даних. В результаті був запропонований та апробований мобільний додаток, що забезпечує зручний інтерфейс, функціональність для управління графіком та нагадуваннями, а також надійне збереження даних користувача.

Ключові слова: мобільний додаток, Kotlin, Jetpack Compose, Jetpack Compose Navigation, Material Design 3, ORM Room, MVVM, OkHTTP.

Вступ.

Сучасний ритм життя ставить перед людиною багато завдань, серед яких важливе місце займає підтримання власного здоров'я. Для цього необхідно дотримуватись рекомендацій лікарів, якщо це необхідно, зокрема, приймати ліки за встановленим графіком. Проте через велику кількість справ і зобов'язань багато людей стикаються з труднощами у відстеженні часу приймання ліків [1].

Розвиток мобільних технологій дозволяє значно спростити цей процес. Завдяки спеціалізованим додаткам користувачі можуть зручно планувати свій



графік, отримувати нагадування та контролювати приймання медичних препаратів. Такі інструменти не лише підвищують дисциплінованість, а й сприяють покращенню якості життя [1].

Метою роботи є створення функціонального програмного продукту, що забезпечує зручність у користуванні, надійність і високий рівень інтерактивності. Результати розробки можуть бути корисними як для індивідуальних користувачів, так і для медичних установ, які прагнуть підвищити ефективність лікування пацієнтів будь якого віку.

У роботі розглянуто основні аспекти предметної області, обґрунтовано вибір технологій, реалізовано функціонал додатка та проведено його тестування. Це дозволяє не лише продемонструвати досягнутий результат, а й надати рекомендації для подальшого вдосконалення продукту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій в області сучасних медичних додатків. Сучасні медичні додатки займають важливе місце у забезпеченні здорового способу життя та покращенні медичного обслуговування. Їх розвиток обумовлений зростанням попиту на зручні цифрові інструменти для управління станом здоров'я, зокрема, контролю за прийманням ліків, моніторингу фізичної активності, аналізу показників організму та підтримки комунікації з лікарями [1, 2].

Додатки для управління графіком приймання ліків мають на меті спростити взаємодію користувачів з власними медичними завданнями. Серед популярних продуктів такого типу можна виділити [1]: Medisafe, який дозволяє створювати детальні графіки приймання ліків, встановлювати нагадування та ділитися інформацією з близькими; MyTherapy, що забезпечує відстеження прийманням ліків, фізичної активності та інших показників здоров'я; Pill Reminder, який орієнтований на мінімалістичний інтерфейс і простоту використання. Основні функції, які характерні для цих додатків [1, 2]: користувачі можуть встановлювати час приймання ліків, періодичність та додавати примітки; додатки генерують сповіщення у вигляді звукових сигналів або push-сповіщень; можливість синхронізації із системними календарями для підвищення зручності;



розширений функціонал, який дозволяє записувати симптоми чи інші важливі дані; забезпечення конфіденційності користувацької інформації є ключовим аспектом у розробці медичних додатків.

Однак, незважаючи на широкий вибір існуючих додатків, багато з них стикаються з проблемами, такими, як перевантаження інтерфейсу, відсутність персоналізації або низька інтеграція з іншими сервісами. Розглядаючи аналоги, можна дійти висновку, що існує необхідність у створенні медичних додатків з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, адаптованим під індивідуальні потреби користувачів. У цій роботі буде запропоновано рішення, що поєднує сучасний дизайн, зручність навігації та надійність зберігання даних.

Вимоги до додатків для управління нагадуваннями.

Додатки для управління нагадуваннями відіграють важливу роль у підтримці дисципліни та організації повсякденного життя користувачів. Особливо це актуально для медичних застосунків, що допомагають дотримуватися графіка приймання ліків. Вимоги до таких програм визначаються потребами користувачів у функціональності, зручності використання та надійності роботи [3].

Однією з основних вимог є інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дозволяє легко створювати, редагувати та видаляти нагадування. Користувачі повинні мати можливість швидко налаштовувати параметри, такі як: час, частота та тривалість нагадувань, без необхідності витрачати багато часу на навчання або освоєння програми. Важливою вимогою є надійність сповіщень. Додаток повинен забезпечувати своєчасне нагадування у вигляді сповіщень, навіть у випадках, коли пристрій перебуває в режимі енергозбереження. Це гарантує той факт, що користувачі не пропустять важливі події чи час приймання ліків [4-5].

Захист конфіденційності даних користувачів є ще одним ключовим аспектом. Оскільки додатки для нагадувань часто містять чутливу інформацію, зокрема щодо медичних препаратів, вони повинні відповідати високим стандартам безпеки. Забезпечення локального шифрування даних або використання надійних серверів для їх зберігання є обов'язковим [4].



Для підвищення зручності ці додатки мають підтримувати інтеграцію з іншими системами, такими, як календарі чи хмарні сервіси. Це дозволяє користувачам синхронізувати нагадування з особистим розкладом і отримувати доступ до них на різних пристроях. Крім того, важливою є можливість адаптації додатка до індивідуальних потреб. Наприклад, програма може пропонувати персоналізовані рекомендації чи функції, засновані на аналізі поведінки користувача. Такий підхід сприяє підвищенню довіри до продукту та його популярності серед користувачів.

Загалом, високоякісний додаток для управління нагадуваннями має бути зручним, ефективним і надійним. Це дозволить забезпечити користувачам можливість легко керувати своїм розкладом і своєчасно виконувати важливі завдання, зокрема, пов'язані з власним здоров'ям.

Вибір технологій для реалізації додатка. Мова програмування Kotlin та її переваги. Kotlin – це сучасна мова програмування, створена для вирішення завдань розробки програмного забезпечення з акцентом на продуктивність, зручність використання та надійність. Вона є офіційно підтримуваною мовою для розробки Android-додатків і широко використовується завдяки своїм потужним можливостям та інтеграції з екосистемою Java [2]. Однією з основних переваг Kotlin є його лаконічність. Код, написаний на Kotlin, зазвичай коротший і зрозуміліший, ніж аналогічний код на Java, завдяки використанню сучасного синтаксису та зменшенню шаблонного коду. Це сприяє швидшій розробці та зменшує ризик помилок. Крім того, Kotlin підтримує сумісність із Java, що дозволяє використовувати існуючі бібліотеки та інтегрувати новий код із наявними Java-проєктами. Це робить його привабливим вибором для поступового переходу від Java до сучасніших підходів у програмуванні [6].

Безпека є ще однією важливою перевагою Kotlin. Мова має вбудовані механізми, що зменшують ймовірність виникнення помилок, таких як `NullPointerException`. Використання системи типів Kotlin дозволяє уникнути помилок, пов'язаних із роботою з `null`-значеннями, забезпечуючи більшу надійність додатків [6, 7].



Функціональні можливості Kotlin включають підтримку лямбда-виразів, корутин для асинхронного програмування, розширення функцій класів без їх зміни та багато інших сучасних інструментів. Це робить мову дуже гнучкою та придатною для широкого кола завдань [8]. Додатковою перевагою цих можливостей є активна підтримка розробників з боку спільноти та компанії JetBrains, яка розробляє Kotlin. Регулярні оновлення мови та інструментів, а також велика кількість документації та ресурсів забезпечують комфортну роботу з цією мовою [6].

Таким чином, Kotlin є потужним інструментом для розробки сучасних додатків. Завдяки своїй зручності, безпеці та гнучкості, мова дозволяє створювати ефективні, надійні та зручні програмні продукти, що відповідають високим стандартам сучасного програмування.

Jetpack Compose для створення інтерфейсу користувача. Jetpack Compose – це сучасний інструмент для розробки інтерфейсів користувача на платформі Android, створений для спрощення та прискорення роботи розробників. Він базується на декларативному підході, що дозволяє описувати інтерфейс у вигляді функцій, які формують структуру елементів без необхідності використання XML [9].

Однією з головних переваг Jetpack Compose є спрощення процесу розробки. Завдяки декларативному синтаксису, розробники можуть описувати компоненти інтерфейсу безпосередньо в коді, а також легко оновлювати їх під час зміни стану програми. Це дозволяє швидше створювати прототипи, тестувати функціональність та вносити зміни. Jetpack Compose забезпечує повну інтеграцію з іншими бібліотеками та компонентами екосистеми Android, такими як Material Design, Navigation і ViewModel. Зокрема, підтримка Material Design 3 дозволяє створювати сучасні, естетичні інтерфейси, які відповідають останнім стандартам дизайну [7, 9, 10].

Гнучкість є ще однією перевагою Jetpack Compose. Інструмент дозволяє легко налаштовувати вигляд і поведінку компонентів, створювати власні елементи інтерфейсу та динамічно змінювати їх залежно від контексту або даних



[10]. Compose також сприяє оптимізації продуктивності. Завдяки використанню ефективного механізму перебудування елементів, оновлюються тільки ті частини інтерфейсу, які зазнали змін. Це підвищує швидкодію додатків, особливо на пристроях із низькою продуктивністю. Ще одним важливим аспектом є простота тестування. Оскільки компоненти інтерфейсу в Compose представлені у вигляді функцій, їх можна легко ізолювати та тестувати окремо. Це знижує складність підтримки коду та дозволяє забезпечувати високу якість продукту [9].

Таким чином, Jetpack Compose є ефективним і сучасним інструментом для створення інтерфейсів користувача, який забезпечує гнучкість, швидкість розробки та відповідність сучасним стандартам дизайну. Його використання сприяє створенню зручних, естетичних і продуктивних додатків, що задовольняють потреби як розробників, так і користувачів.

Окрім того, для організації навігації застосовують бібліотеку Jetpack Compose Navigation, яка забезпечує зручний і сучасний підхід до реалізації навігації в додатках, розроблених із використанням Jetpack Compose. Вона дозволяє ефективно управляти переходами між екранами та створювати логічну структуру додатка, підтримуючи декларативний стиль програмування [7]. Однією з основних переваг Jetpack Compose Navigation є її інтеграція з Compose, що дозволяє створювати та налаштовувати маршрути безпосередньо в коді. Замість використання XML-файлів, які традиційно застосовувалися у фреймворку Android, розробники можуть визначати навігаційні графи у вигляді функцій, що робить процес більш гнучким і зручним [8-10]. Бібліотека підтримує роботу з параметрами маршруту, що дозволяє передавати дані між екранами. Наприклад, користувач може передати ID нагадування чи інформацію про приймання ліків із одного екрану на інший без зайвих складнощів. Це забезпечує динамічну поведінку додатка та гнучкість у роботі з даними.

Jetpack Compose Navigation також підтримує функцію back stack (стек повернень), яка автоматично управляє переходами назад. Це дозволяє користувачам легко повертатися до попередніх екранів, зберігаючи їхній стан. У



складніших сценаріях розробники можуть додатково налаштувати стек навігації для управління поведінкою додатка. Ще однією важливою можливістю є підтримка *deep links* (глибоких посилань). Це дозволяє користувачам переходити до конкретного екрану в додатку безпосередньо з посилання, наприклад, з електронної пошти або повідомлення. Такі функції особливо корисні для додатків, пов'язаних із нагадуваннями, де *deep links* можуть використовуватися для швидкого доступу до конкретного запису чи події. Jetpack Compose Navigation також спрощує організацію складних навігаційних структур, таких як вкладені навігаційні графи. Це дозволяє створювати модульні та масштабовані додатки, в яких кожна частина має свою ізольовану логіку навігації [8, 9].

У підсумку, Jetpack Compose Navigation є потужним інструментом для створення логічної та зручної навігації в додатках. Завдяки декларативному стилю програмування, гнучкості та підтримці сучасних функцій, вона дозволяє створювати інтуїтивно зрозумілі та функціональні продукти, які задовольняють потреби користувачів.

Користувацький дизайн для зручності користувачів можна створювати на основі Material Design 3 (MD3), яка є сучасною системою дизайну, розроблена компанією Google, яка спрямована на створення інтуїтивно зрозумілих, естетично привабливих і адаптивних інтерфейсів користувача. Вона забезпечує узгодженість зовнішнього вигляду додатків на різних платформах, сприяючи підвищенню зручності та задоволеності користувачів [5,7,8].

Однією з ключових переваг MD3 є підтримка персоналізації. Завдяки концепції Material You, користувачі можуть адаптувати вигляд додатка відповідно до своїх уподобань, включаючи вибір кольорової палітри, що генерується автоматично на основі шпалер пристрою. Це створює відчуття індивідуального підходу та покращує взаємодію з продуктом. MD3 орієнтований на доступність, забезпечуючи оптимальну читабельність текстів, контрастність елементів і зрозумілі візуальні підказки. Наприклад, кнопки, поля вводу та інші компоненти мають чітко визначені межі та зрозумілі стани (натиснута, вибрано, недоступно), що полегшує їх використання навіть для людей із вадами зору.



Особлива увага приділяється інтерактивності та анімації [7, 9]. Material Design 3 пропонує набір анімованих переходів і ефектів, які роблять взаємодію з додатком більш плавною та природною. Це допомагає користувачам краще орієнтуватися в інтерфейсі, спрощуючи виконання завдань. MD3 підтримує принципи адаптивного дизайну, що дозволяє інтерфейсам автоматично підлаштовуватися під різні розміри екранів. Це забезпечує зручне використання додатків як на мобільних пристроях, так і на планшетах або навіть настільних комп'ютерах [8]. Крім того, використання MD3 сприяє економії часу розробників завдяки готовому набору компонентів, таких як кнопки, картки, діалогові вікна та панелі навігації. Ці елементи вже оптимізовані для сучасних вимог і відповідають кращим практикам дизайну, що значно прискорює процес розробки.

У підсумку, Material Design 3 пропонує потужний інструментарій для створення зручних, функціональних і стильних інтерфейсів, які відповідають очікуванням користувачів. Завдяки адаптивності, персоналізації та орієнтації на доступність, MD3 є невід'ємною складовою сучасних додатків, які прагнуть забезпечити високий рівень користувацького досвіду.

Для зберігання даних застосовується бібліотека ORM Room, яка призначена для роботи з базами даних у додатках, що використовують платформу Android. Вона є частиною Android Jetpack і призначена для спрощення доступу до SQLite-бази даних, дозволяючи зберігати та отримувати дані за допомогою об'єктів, що представляють таблиці бази даних. Room автоматизує багато аспектів роботи з базами даних, забезпечуючи більшу зручність і надійність порівняно з прямим використанням SQLite. Однією з основних переваг Room є його інтеграція з Kotlin та Jetpack Compose. Це дозволяє розробникам використовувати сучасні можливості мови та фреймворку для створення ефективних додатків, що працюють із базами даних. Room використовує анотації для визначення сутностей бази даних (таблиць), що робить код чистим і зрозумілим, а також дозволяє автоматично генерувати SQL-запити [2].

Бібліотека Room включає кілька важливих компонентів, а саме Entity – анотація, що визначає клас як сутність бази даних (таблицю); Dao (Data Access



Object) – інтерфейс, який містить методи для роботи з базою даних. Room автоматично генерує імплементацію цього інтерфейсу; Database – анотація для створення бази даних, яка визначає всі сутності та DAO, що використовуються в додатку. Цей підхід дозволяє зменшити кількість шаблонного коду та уникнути помилок, пов'язаних із прямим написанням SQL-запитів. Room підтримує складні операції, такі як асинхронні запити, транзакції, індекси та зовнішні ключі, що робить роботу з базою даних більш гнучкою та безпечною. Room також дозволяє зберігати складні структури даних, такі як списки або об'єкти, і працювати з ними, підтримуючи різні типи відносин між сутностями (один до одного, один до багатьох, багато до багатьох). Ця гнучкість робить його ідеальним рішенням для зберігання даних у додатках, які потребують складної логіки збереження. Нарешті, Room забезпечує високий рівень продуктивності, використовуючи індексацію та оптимізуючи запити, щоб зменшити навантаження на систему, навіть за великих обсягів даних. Room працює на основі SQLite, який є легким та швидким механізмом збереження даних, що дозволяє використовувати його в мобільних додатках з обмеженими ресурсами [7-10].

У підсумку, ORM Room є потужним інструментом для зберігання та управління даними в додатках Android. Завдяки своїй простоті використання, безпеці та інтеграції з сучасними технологіями, Room дозволяє розробникам створювати надійні, продуктивні та зручні додатки для зберігання даних.

Для HTTP-запитів використовується бібліотека OkHTTP, яка є потужною засобом для здійснення HTTP-запитів та широко використовується в Android-розробці для обміну даними між клієнтом та сервером. Вона пропонує простий, ефективний та гнучкий інтерфейс для роботи з мережевими запитами, що дозволяє розробникам зосередитися на логіці додатка, а не на деталях взаємодії з мережею. OkHTTP підтримує різні типи HTTP-запитів, включаючи GET, POST, PUT, DELETE та інші, а також забезпечує високий рівень кастомізації. Вона дозволяє легко налаштовувати заголовки, параметри запитів, а також працювати з тілами запитів та відповідей у різних форматах, таких як JSON, XML, чи навіть



мультимедійні файли. Бібліотека ефективно працює з великими обсягами даних, використовуючи потоки для обробки великих файлів і мінімізації витрат пам'яті [7].

Однією з ключових переваг OkHTTP є підтримка асинхронного виконання запитів. Це дозволяє виконувати мережеві операції у фоновому режимі, не блокуючи основний потік програми, що критично для мобільних додатків, де важлива швидкість відгуку та зручність використання. Бібліотека також забезпечує зручну обробку помилок і має вбудовані механізми для управління повторними спробами запитів, що значно покращує стабільність додатків [8].

OkHTTP підтримує додаткові функціональності, такі як кешування відповідей, що дозволяє зменшити навантаження на сервери і зменшити затримки у виконанні запитів, особливо в умовах обмеженої пропускної здатності мережі. Бібліотека також має інтеграцію з іншими інструментами, такими як Retrofit, для ще зручнішої обробки API-запитів. Використання OkHTTP забезпечує надійну та ефективну роботу з мережею в Android-додатках. Завдяки своїй простоті, гнучкості та широкому набору функцій, OkHTTP є однією з найпопулярніших бібліотек для роботи з HTTP-запитами на платформі Android. OkHTTP має низку механізмів безпеки, таких як підтримка SSL/TLS для захищених з'єднань, що дозволяє забезпечити безпечний обмін даними між клієнтом і сервером. Вона також дозволяє налаштовувати власні параметри безпеки, зокрема управління сертифікатами або перевіркою сертифікатів під час підключень [8].

Завдяки своїй гнучкості, швидкості та простоті використання, OkHTTP є однією з найпопулярніших бібліотек для роботи з HTTP-запитами в екосистемі Android і Java. Її можливості з кешування, асинхронної обробки та налаштування з'єднань роблять її ідеальним вибором для побудови стабільних, масштабованих і високопродуктивних додатків.

Розробка та побудова архітектури програмного продукту.

Архітектура програмного продукту визначає структуру та взаємодію всіх компонентів додатка, що впливає на його ефективність, масштабованість та



зручність для користувача [3]. Одним із найбільш популярних підходів до побудови архітектури сучасних Android-додатків є модель MVVM (Model-View-ViewModel), яка забезпечує чітке розділення логіки додатка, інтерфейсу користувача та збереження даних. У контексті додатка для управління графіком приймання ліків і нагадуваннями, архітектура MVVM забезпечує гнучкість і зручність у роботі з даними, управлінні взаємодією з користувачем та обробці різних подій у додатку [4]. Модель MVVM складається з трьох основних компонентів: Model, View і ViewModel (рис. 1).

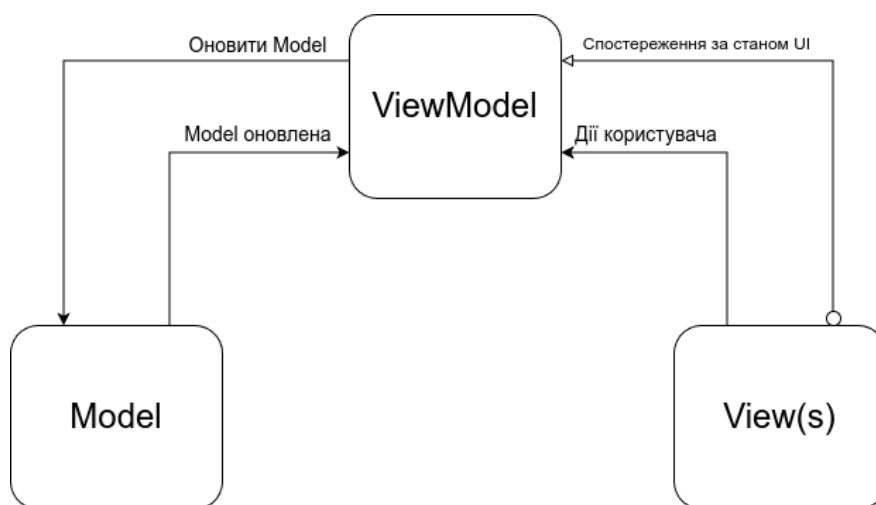


Рисунок 1 – Діаграма моделі MVVM

Model є складовою, яка відповідає за бізнес-логіку додатка та обробку даних. Вона включає в себе компоненти, які зберігають і обробляють інформацію, таку як дані про ліки, час приймання, нагадування і стан користувача. У додатку це може бути база даних, якою керує ORM Room, або зовнішні джерела даних, такі як API для синхронізації з іншими сервісами. Модель не повинна знати нічого про інтерфейс користувача та не має прямого доступу до елементів UI. View є безпосередньо інтерфейсом користувача, через який користувач взаємодіє з додатком. Це, наприклад, екрани для додавання нових ліків, перегляду розкладу, налаштування тощо. View відповідає за виведення інформації на екран і реагує на введення користувача, наприклад, натискання кнопок чи вибір елементів списку. Вона отримує всі необхідні дані від ViewModel і відображає їх, не виконуючи ніякої складної логіки. Це дає змогу



відокремити відображення даних від їхнього оброблення, що спрощує підтримку коду. ViewModel є проміжним шаром між View і Model. Його основна роль полягає в управлінні станом UI та обробці бізнес-логіки. ViewModel отримує дані з Model і підготовлює їх у вигляді, який зручно відображати в інтерфейсі користувача. Завдяки цьому ViewModel дозволяє підтримувати чистоту інтерфейсу користувача, не навантажуючи його логікою, що призводить до більш гнучкого та тестованого коду. Використання MVVM в архітектурі додатка дозволяє досягти кількох ключових переваг. По-перше, воно забезпечує чітке розділення відповідальностей, що робить додаток більш модульним і зручним для масштабування. По-друге, архітектура сприяє кращій тестованості, оскільки логіка додатка розділена на окремі частини, що дозволяє тестувати кожен з них незалежно. І, нарешті, MVVM дозволяє легко керувати станом UI та реакцією на зміни даних, що є критично важливим для створення додатків із динамічним інтерфейсом, таких як додатки для управління нагадуваннями [5].

Таким чином, архітектура MVVM для створення програмного продукту не лише покращує організацію коду, але й підвищує ефективність взаємодії з користувачем, робить додаток більш зручним і стабільним.

Реалізація функціоналу запису лікарських засобів.

Функціонал запису лікарських засобів у додатку реалізується через використання архітектури MVVM та ORM Room для зберігання даних. Цей процес забезпечує зручне введення, збереження та подальше використання інформації про ліки, які приймає користувач.

Опис реалізації цього функціоналу охоплює кілька ключових етапів. На першому етапі, Model в архітектурі MVVM визначає сутність лікарського засобу. Використовуючи Room, кожен запис про лікарський засіб стає окремим об'єктом, що містить основні властивості, такі як назва ліків, дозування, періодичність приймання, час та інші деталі, що можуть бути корисними для користувача. Room дозволяє ефективно зберігати ці дані в локальній базі даних, автоматично генеруючи необхідні SQL-запити та забезпечуючи доступ до них через DAO (Data Access Object). Для збереження даних у базі, необхідно



створити відповідну таблицю, де кожен запис буде мати унікальний ідентифікатор, а також інші атрибути, які дозволять користувачеві налаштувати нагадування для кожного лікарського засобу.

Наступним етапом є ViewModel, який займається управлінням бізнес-логікою і забезпечує зв'язок між View та Model. ViewModel отримує дані про лікарські засоби з Room, обробляє їх і надає в доступному для інтерфейсу вигляді. Наприклад, ViewModel може отримувати список всіх збережених лікарських засобів або окремі записи, фільтруючи їх за певними критеріями, такими як дата приймання або ім'я препарату. У процесі додавання нового лікарського засобу ViewModel обробляє введену користувачем інформацію, перевіряє коректність введених даних (наприклад, дозування, частота приймання) та передає ці дані до Model для збереження в базі.

ViewModel також може передавати необхідні команди для виклику додаткових функцій, таких як налаштування нагадувань. View, як частина архітектури MVVM, відповідає за відображення даних на екрані та введення користувача. Це може бути форма для введення даних лікарських засобів, де користувач заповнює необхідні поля, такі як назва ліків, дозування, час приймання тощо. Після заповнення форми та підтвердження введених даних View передає їх у ViewModel для подальшої обробки та збереження. Завдяки використанню MVVM, логіка взаємодії з користувачем та збереження даних є чітко розділеною. ViewModel обробляє всю бізнес-логіку, а View відповідає лише за виведення інформації та даних від користувача. Це дозволяє значно зменшити складність коду та покращити підтримку і тестування додатка. Room, у свою чергу, забезпечує ефективне зберігання і отримання даних про лікарські засоби, дозволяючи додатку працювати швидко і стабільно.

Таким чином, використання MVVM і ORM Room для реалізації функціоналу запису лікарських засобів дозволяє побудувати ефективну, масштабовану та зручну систему управління прийманням ліків, що забезпечує користувачеві можливість легко додавати, редагувати та переглядати інформацію про ліки.



Реалізація нагадувань про приймання ліків.

Функціонал нагадувань про приймання ліків у додатку реалізується через використання AlarmManager – інструмента Android для планування виконання задач у певний час або через певні інтервали. Це дозволяє створювати нагадування, які будуть активуватися навіть якщо додаток не працює в цей момент.

Основний принцип реалізації цього функціоналу полягає в плануванні повторюваних або одноразових будильників для нагадувань про приймання ліків, використовуючи введені користувачем дані про час приймання ліків. Користувач має можливість задати конкретний час для приймання кожного лікарського засобу, а також налаштувати частоту повторення нагадувань – наприклад, щодня або кілька разів на день. Після введення цих даних, додаток повинен зберегти ці налаштування в локальній базі даних (за допомогою ORM Room), а також налаштувати відповідні будильники для кожного приймання ліків.

AlarmManager дозволяє створювати будильники, які будуть виконуватися в заданий час. Кожен будильник пов'язаний з певною дією, наприклад, сповіщенням користувача про необхідність приймання ліків. Для цього можна використовувати PendingIntent – об'єкт, який вказує на дію, яку потрібно виконати, коли будильник спрацює. У випадку нагадування це може бути створення сповіщення, яке з'являтиметься на екрані користувача у вигляді push-повідомлення або системного сповіщення. При створенні нагадувань додаток має враховувати точність часу. Коли користувач додає нові ліки або редагує наявні записи, система повинна оновлювати відповідні будильники, замінюючи старі на нові, якщо час або інтервал змінилися. Це дозволяє забезпечити точність у нагадуваннях і уникнути дублювання нагадувань для одного і того ж часу.

Одним з важливих аспектів є можливість скасування або повторного планування будильників. Наприклад, якщо користувач скасовує приймання ліків або змінює частоту нагадувань, додаток повинен видалити попередньо налаштовані будильники для цього препарату і створити нові, з урахуванням



змін. У випадку, коли додаток знаходиться на фоні або неактивний, AlarmManager все одно буде забезпечувати своєчасне виконання нагадувань, що робить функціонал нагадувань надзвичайно важливим для ефективного використання. Це дозволяє користувачеві не залежати від того, чи працює додаток в даний момент, і гарантує отримання повідомлення у потрібний момент.

Завдяки використанню AlarmManager додаток для нагадувань про приймання ліків може функціонувати безперервно, навіть коли користувач не взаємодіє з додатком, забезпечуючи максимальну зручність і підтримку здоров'я.

Розробка бази даних для збереження інформації.

Для збереження інформації про лікарські засоби та нагадування про їх приймання в додатку використовується локальна база даних, що забезпечує ефективне збереження та доступ до даних навіть без підключення до Інтернету. Для реалізації цієї бази даних застосовується ORM-бібліотека Room, яка надає зручний спосіб взаємодії з SQLite. База даних складається з двох основних сутностей: Medicine і NotificationCard, кожна з яких відповідає за збереження певної інформації.

Сутність Medicine зберігає основну інформацію про лікарські засоби, яку користувач вводить або редагує. Вона містить такі поля, як назва ліків, тип препарату, час і умови приймання, а також додаткові нотатки, які можуть бути корисними для користувача. Поле imageUrl зберігає посилання на зображення препарату, яке може бути корисним для візуальної ідентифікації ліків, хоча воно є необов'язковим. Всі ці дані зберігаються в таблиці medicines, що дає змогу додаткам зберігати та відновлювати їх для подальшого використання. Сутність NotificationCard відповідає за збереження інформації про нагадування для кожного лікарського засобу. Вона містить дані про час приймання ліків в форматі HH:mm і список днів тижня, коли потрібно приймати ліки. Дні тижня зберігаються як серіалізований список, що дозволяє гнучко налаштовувати нагадування на різні комбінації днів. Кожен запис у таблиці notification_cards



пов'язаний із конкретним препаратом, зберігаючи його назву та час приймання, що дає можливість створювати нагадування для кожного з лікарських засобів на відповідні дні.

Використання Room забезпечує зручне зберігання цих даних у локальній базі даних, а також ефективне управління ними через DAO (Data Access Object). DAO використовуються для доступу до таблиць, виконання запитів для додавання, оновлення та видалення записів.

Таким чином, база даних дозволяє зберігати всю необхідну інформацію про лікарські засоби та нагадування про їх приймання, що забезпечує зручне та швидке управління даними, а також підтримує їхню цілісність і ефективність у рамках роботи додатка. Всі ці можливості дають змогу користувачеві мати доступ до актуальної інформації в будь-який час без необхідності підключення до Інтернету

Розробка інструкції користувача.

Почнемо з того, що користувачу необхідно завантажити та встановити додаток. Відразу після запуску додатка відкривається початковий екран з якої можна почати використовувати «Додаток» та всі його функції. Це зображено на рис. 2.



Рисунок 2 – Початковий екран

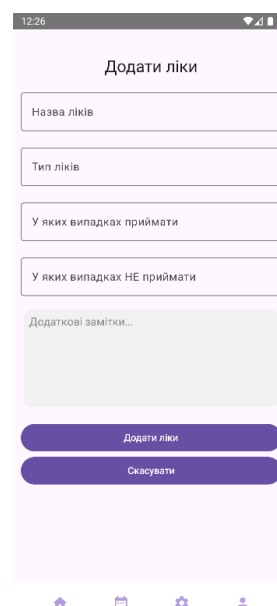


Рисунок 3 - Форма додавання ліків



Натиснувши на кнопку додати – користувачу буде запропоноване заповнити форму та додати новий лікарський засіб (рис. 3).

Всі додані лікарські засоби будуть додані на головний екран у вигляді списку з можливістю їх видалити, якщо це буде потрібно (рис. 4). Для створення нагадування про приймання ліків – користувач може перейти на наступний екран (рис. 5) та натиснути на кнопку «Додати», що у свої чергу відкриє форму для додавання нагадування (рис. 6).

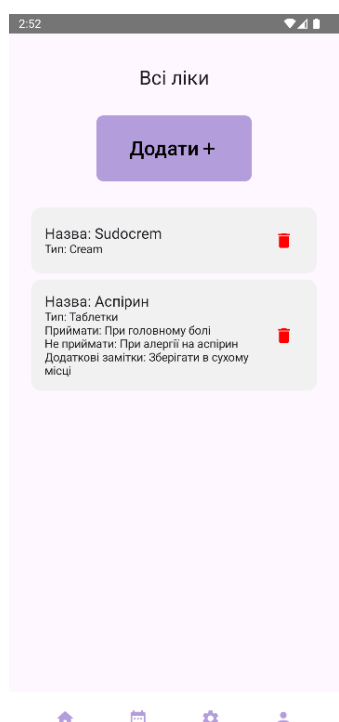


Рисунок 4 – Список ліків на головному екрану



Рисунок 5 – Сторінка нагадувань

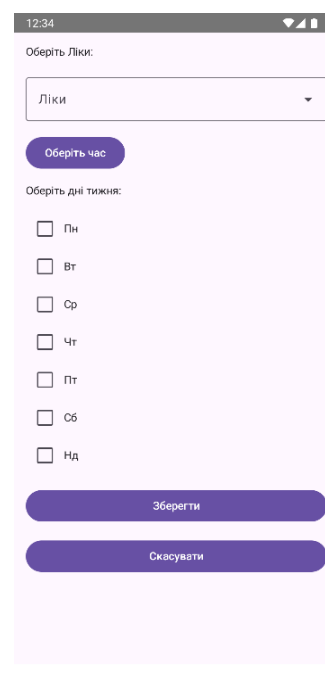


Рисунок 6 – Форма створення нагадування

Всі додані нагадування будуть відображатися на екрані у вигляді списку з можливістю їх відмітити та видалити, якщо це буде потрібно користувачу (рис. 7). Для синхронізації даних та зберігання інформації на віддаленому сервері – користувач може зареєструватися та увійти у свій обліковий запис (рис. 8). Якщо дані вірні – користувач побачить екран (рис. 9), що проінформує користувача, що він успішно зайшов у свій обліковий запис з можливістю виходу з нього.

Користувачі можуть реєструватися, входити в систему, переглядати



лікарські засоби, додавати інші засоби, або змінювати їх; виконувати вправи, які рекомендують реабілітологи, перевіряти свій прогрес та виходити з системи.

Висновки. Проведено аналіз предметної області та вимог до мобільних додатків для управління графіком і нагадуваннями про приймання ліків. На основі цього було визначено ключові функціональні вимоги до розробки програмного продукту. Було обґрунтовано вибір технологій, включаючи мову програмування Kotlin, Jetpack Compose для створення інтерфейсу користувача, Material Design 3 для забезпечення сучасного дизайну, Jetpack Compose Navigation для навігації, а також ORM Room для збереження даних. Розроблено архітектуру мобільного додатка, яка включає функції створення та управління налаштуваннями нагадувань і надійного збереження даних. Виконана інтеграція всіх компонентів та протестована функціональність програми, включаючи її інтерфейс та зручність використання користувачами.

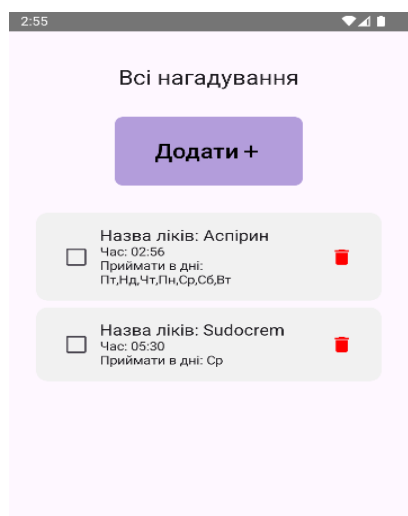


Рисунок 7 – Список нагадувань на сторінці нагадувань

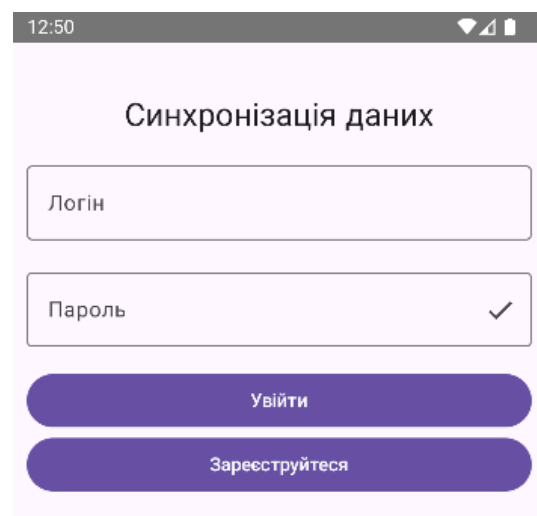


Рисунок 8 – Форма авторизації

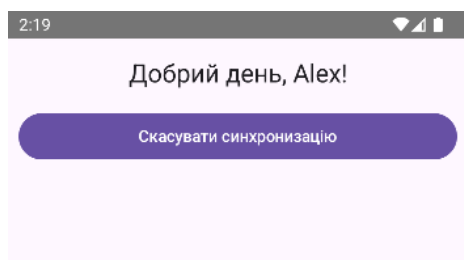


Рисунок 9 – Функціонал розділу «Exercises»



В якості резюме можна додати, що результатом роботи став мобільний додаток, що забезпечує зручний користувацький досвід, дозволяє користувачам ефективно керувати своїм графіком та отримувати своєчасні нагадування про приймання ліків. Отримані результати демонструють можливість створення високоякісного програмного продукту з використанням сучасних технологій і можуть слугувати основою для подальшого вдосконалення додатка не тільки для нагадування про приймання ліків, а й для інших задач (технічних, педагогічних, медичних, навчальних, облікових та інших завдань).

Література:

1. Як відстежувати прийом ліків за допомогою iOS та Android: 7 простих програм [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mezha.media/articles/vidstezhyty-pryyom-likiv/>
2. Android Basics with Compose [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://developer.android.com/courses/android-basics-compose/course>
3. Роберт Мартін: Чиста архітектура: мистецтво розробки програмного забезпечення: Фабула, 2019, 416 с.
4. Paul Clements, Rick Kazman: Software Architecture in Practice: Addison-Wesley Professional, 2012, 322 p.
5. Моделювання та аналіз програмного забезпечення: методичні вказівки до практичних та лабораторних занять. / Укладач: Л.В. Глазунова - Одеса:ДУІТЗ, 2021., с. 92.
6. Create and use functions in Kotlin | Android Developers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://developer.android.com/codelabs/basic-android-kotlin-compose-functions>
7. Diana MacDonald, Practical UI Patterns for Design Systems: Fast-Track Interaction Design for a Seamless User Experience – Apress; 1st ed. edition (June 27, 2019) – 315 pages.
8. Jenifer Tidwell, Charles Brewer, Aynne Valencia, Designing Interfaces: Patterns for Effective Interaction, 3rd Edition – O'Reilly Media, (February 18, 2020) – 599



pages.

9. Martin Kleppmann, Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems, 1st Edition – O'Reilly Media, (May 2, 2017) – 611 pages.

10. SOLID (об'єктно-орієнтоване програмування) – Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/SOLID_\(об'єктно-орієнтоване_програмування\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/SOLID_(об'єктно-орієнтоване_програмування))

Abstract. *The article deals with the issue of developing a convenient and functional mobile application that provides management of reminders for timely medication. The main aspects of the subject area are considered, the choice of technologies is substantiated, the application functionality is implemented and its testing is carried out. This allows us not only to demonstrate the achieved result, but also to provide recommendations for further product improvement. In the design process, we used widely used technologies, including the Kotlin programming language, the Jetpack Compose framework for creating a user interface using Material Design 3, Jetpack Compose Navigation for organising navigation, and ORM Room for working with the database. As a result, a mobile application was proposed and tested that provides a user-friendly interface, functionality for managing schedules and reminders, and reliable storage of user data.*

Key words: *mobile app, Kotlin, Jetpack Compose, Jetpack Compose Navigation, Material Design 3, ORM Room, MVVM, OkHTTP*

Статтю надіслано: 20.05.2025 р.

© Алтухова Т.В., Сергієнко Л.Г., Сергієнко О.О.



AI SOLUTIONS IN BUILDING NATIONAL CYBER MONITORING AND CRISIS INCIDENT MANAGEMENT SYSTEMS

Rudnytskyi Oleksii

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4062-941X>

Owner, LLC "Standard Postachannya", Vostok Invest LLC

Abstract. *The article presents a systematic generalization and typology of artificial intelligence technologies applied not in the general context of cybersecurity but specifically for national cyber monitoring and crisis incident management. For the first time within a scientific analysis, a list of AI technologies is provided along with descriptions of their functional capabilities in the field of crisis response. The article outlines the key challenges of implementing AI in state security institutions and substantiates the need to develop a new generation of interdisciplinary specialists as a prerequisite for effective digital transformation of national security systems. The purpose of the article is to identify trends and justify the relevance of approaches for implementing artificial intelligence technologies in national cyber monitoring and crisis incident management systems. The research results show that national systems for cyber monitoring and crisis incident management are essential components of a state's cybersecurity architecture, as they ensure the ability to promptly detect, prevent, and respond to threats in the digital space. An analysis was conducted on the specific features of these systems, including the need for continuous monitoring of information flows, user behavior, network activity, and malicious impacts on critical infrastructure. It is proven that the evolution of digital threats has rendered traditional cybersecurity tools insufficient, prompting a transformation in security approaches and a shift toward advanced models based on big data analysis and predictive capabilities. The study demonstrates that modern AI-based solutions, including machine learning, deep learning, reinforcement learning, convolutional neural networks, and hybrid AI models, significantly enhance the efficiency of crisis response. These technologies enable behavioral analytics, detection of hidden cyber threats, real-time log analysis, and automated incident response. The integration of AI into cloud-based monitoring systems enables scalable data processing, minimizes human factor impact, and ensures rapid response. The practical significance of the study lies in establishing a methodological foundation for developing innovative AI solutions in the field of cybersecurity at the national system level.*

Keywords: artificial intelligence, cyber monitoring, crisis incidents, national security, machine learning.

Introduction

In the modern era of technological transformation, digitalization is penetrating every aspect of life – from everyday domestic needs to critical state institutions. At the same time, the development of artificial intelligence (AI) is advancing at an unprecedented pace: within just a few years, these technologies have evolved from experimental lab solutions to practical tools capable of real-time analytics, decision-making, process coordination, and nationwide automated management. This rapid progress brings large-scale challenges, with security emerging not merely as a relevant issue but as a defining one. Traditional approaches to protecting information systems



are proving inadequate in the face of increasingly complex cyber threats and the deep integration of digital services into public administration.

Security has long transcended individual, commercial, or even administrative concerns – it has become a systemic issue of national importance. Given that most key government functions – financial oversight, healthcare, energy, transportation, and defense – operate through digital platforms, any vulnerability in cyberspace potentially threatens national sovereignty. In this context, building an effective system for national cyber monitoring and crisis incident management using artificial intelligence technologies shifts from being a technical task to becoming a strategic priority that determines a state's ability to maintain integrity, stability, and resilience in the digital age.

The application of AI solutions for developing national systems of cybersecurity monitoring and incident management remains insufficiently explored in academic literature. Existing publications only partially address this topic, mostly focusing on related areas such as AI integration in cybersecurity, attack detection techniques, models of governmental cyber governance, or threat analytics. Nonetheless, several studies provide valuable theoretical and practical foundations for further analysis.

Among the most notable publications shaping the scientific background of this subject are those by authors who explore the role of AI in cybersecurity – L. Ofusori, T. Bokaba, S. Mhlongo [5]; M.K. Rahman, H. Dalim [6]; and C. Tiwari, S. Pillai, A.J. Obaid, A.R. Saear, A.K. Sabr [8]. Research on aspects of national cybersecurity governance is presented in the works of A. Davydiuk and O. Potii [2], as well as A. Santisteban, L. Ocares-Cunyarachi, and L. Andrade-Arenas [7]. Significant contributions to the development of cyber threat monitoring and detection methods have been made by N. Gupta, V. Jindal, and P. Bedi [3].

Despite the available literature, there is a clear lack of structured material on the subject of this study. Therefore, various scientific methods were applied to analyze, categorize, and organize the available information and present it in the context of the research topic.



Purpose of the article

The purpose of the article is to identify trends and justify the feasibility of applying approaches to the implementation of artificial intelligence technologies in national systems for cyber monitoring and crisis incident management.

Research results

Technology plays a profound role in addressing global threats. This issue concerns society as a whole and cannot be underestimated, especially considering the growing number of victims of cyberattacks targeting national information systems. Concerns about data fraud and cyberattacks have become critically important across the world. According to the General Packet Radio Service, a number of technological vulnerabilities have been identified: two-thirds of internet users are aware of the risks associated with identity theft, fake news, and data privacy, both in business and in the public sector [7].

Ensuring cybersecurity is an essential component of national security. The tasks involved in building a national system for cyber monitoring and crisis incident management include:

- active use of cyber tools in international competition;
- the competitive development of cybersecurity tools amid rapid and transformative changes in information and communication technologies, particularly in cloud and quantum computing, 5G networks, big data, the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and others;
- the militarization of cyberspace and the development of cyberweapons, which enable covert cyberattacks to support military operations and intelligence or sabotage activities in cyberspace;
- the impact of global medical and military threats on economic activity and social behavior, which has led to a rapid transformation and reorganization of a significant segment of social relations into remote formats, heavily reliant on electronic services and automated control systems;
- the introduction of new technologies, digital services, and electronic interaction mechanisms between citizens and the state, which are being implemented



inconsistently within cybersecurity frameworks and often without proper risk assessment [2].

While information threats and risks may be universal in nature, national security strategies vary depending on the policies adopted by individual countries or regional alliances. For example, the European Union builds its strategies on the principles of data privacy protection, forming a context of ethical foundations and principles to safeguard the universal right to privacy [7]. Within the EU, a key role is played by the EU Cybersecurity Strategy for the Digital Decade (2020), which aims to build a resilient digital ecosystem capable of withstanding both internal and external cyber threats. A significant regulatory foundation is also provided by the Cybersecurity Act (Regulation (EU) 2019/881), which introduces a European cybersecurity certification framework and strengthens the mandate of the European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). Additionally, the implementation of the NIS2 Directive (Directive (EU) 2022/2555) holds great importance, as it defines the responsibilities of member states in protecting critical infrastructure sectors, including energy, transport, healthcare, and finance.

In developed countries outside the EU – such as the United States, Canada, Japan, and South Korea – similar strategic documents have been adopted and tailored to the national context, including the National Cybersecurity Strategy (USA), Canada's National Cyber Security Strategy, the Cybersecurity Strategy of Japan, and the Korean National Cybersecurity Strategy. These frameworks emphasize coordination among state bodies, the development of cyber defense, collaboration with the private sector, enhancement of incident response capabilities, and international cooperation. In contrast, in Latin America, although most states have the capacity to respond to cyberattacks, only six have actually developed cybersecurity strategies. The latest country to introduce such a strategy was Mexico, which joined the small group of Latin American countries with similar policies – including Colombia, Panama, Paraguay, Chile, and Costa Rica – on November 13, 2017, according to data from the OAS [1].

As cyber threats have become more complex and sophisticated, cybersecurity has undergone a rapid evolution in recent years.



Table 1 – Evolution of technologies used in the development of national cybersecurity

Period	Technologies	Characteristics
Before 2000	Antivirus software, basic firewalls	Signature-based approach: antivirus programs, firewalls, manual threat database updates.
2000–2010	IDS/IPS, next-generation firewalls	Expanded tools, network-level protection, real-time updates.
2010–2015	SIEM, sandboxing, behavior analysis	Behavioral analysis, event correlation, automated detection of advanced attacks.
2015–2020	SOAR, threat intelligence, cloud security	Use of big data, automated response, expanded cloud-based solutions.
2020–present	AI/ML systems, Zero Trust Architecture, UEBA	Artificial intelligence, Zero Trust, behavioral biometrics, proactive defense.

Note: systematized by the author based on [6]

Traditional protection mechanisms based on signatures no longer provide an adequate level of resistance to modern cyberattacks. As noted by Rahman M.K. and Dalim H., conventional cybersecurity tools largely rely on predefined patterns to detect malicious activity, which makes them vulnerable to emerging attack vectors [6].

Modern security systems, in contrast, must be highly adaptive, polymorphic, and faster than human reaction capabilities [4]. Artificial intelligence in cybersecurity is increasingly viewed not merely as a tool for solving existing problems, but as a foundation for predictive analytics that supports a proactive approach to risk management. This approach enables not only a rapid response to incidents but also the anticipation of potential threats before they materialize.

The integration of predictive analytics into national cybersecurity strategies is gaining momentum due to its proactive nature. Implementing such models also helps reduce the number of false positives – a common issue for signature-based systems, which often misidentify benign activity as malicious. This is especially critical in high-risk environments, such as national cybersecurity infrastructures, where false alarms can lead to unnecessary resource expenditure. Moreover, the predictive capabilities of AI can be embedded into cyber intelligence systems, allowing the identification of emerging threats before they are executed. A study by Tomar S. and Singh P. demonstrated that AI-based cyber intelligence systems can process large volumes of unstructured data from various sources, including open sources, the dark web, and



historical attack data, in order to predict future cyberattacks. By identifying new threats and adversary tactics, these systems enable governments and organizations to proactively reduce risks and enhance the overall resilience of national cybersecurity [9].

Artificial intelligence in cybersecurity is almost never used as a standalone tool. Its effectiveness significantly increases when combined with other technologies that are either built upon its core algorithms or integrate its functionality into more complex systems. A summarized list of such technologies is presented in Table 2.

Table 2 – Technologies combined with AI in the field of cybersecurity

Technology	Application characteristics
Machine learning (ML)	Analysis of large data volumes, anomaly detection, adaptation to new threats.
Deep learning	Modeling complex dependencies, detection of APTs and other sophisticated attacks.
Reinforcement learning	Automated decision-making, adaptation based on feedback, reduced response time.
Convolutional neural networks (CNN)	Pattern recognition in network traffic and system logs.
Hybrid AI models	Combining learning methods to improve accuracy and resilience to emerging threats.
Cloud systems with AI integration	Real-time monitoring, scalability, reduced need for manual intervention.

Note: systematized by the author

AI-based systems use machine learning (ML) algorithms to analyze large volumes of data and identify behavioral patterns that may indicate potential security breaches. These systems are capable of detecting subtle changes in network traffic, user behavior, and system interactions that may go unnoticed by traditional monitoring tools [10]. As a subfield of AI, machine learning is particularly valuable in the context of national cyber monitoring and crisis incident management, as it enables systems to learn from historical data and adapt to new threats over time. For instance, supervised learning algorithms can be trained on labeled datasets containing both benign and malicious activity. Once trained, the system can use this knowledge to classify incoming events and assess their level of suspicion. Deep neural network models used to detect potential attack patterns through system log analysis have achieved accuracy rates of up to 92%.



This demonstrates AI's ability to recognize complex patterns in large datasets, allowing not only for reactive responses but also for predictive threat detection [6].

The role of machine learning in national cyber monitoring and incident management is further supported by a study conducted by Tiwari C., Pillai S., Obaid A.J., Saear A.R., and Sabr A.K., who proposed an automated incident response system using reinforcement learning. This approach allows national cyber monitoring systems to continuously adapt and optimize their actions based on outcomes of previous decisions. ML-based automation has been shown to reduce response time by up to 60% compared to manual methods. The authors also noted that reinforcement learning algorithms are especially effective in combating dynamic threats, as they can learn from both successful and unsuccessful actions, improving performance over time [8].

Similarly, other studies, including Gupta et al. (2019), have shown that AI-based IDS systems, particularly those utilizing convolutional neural networks (CNN), can automatically learn attack patterns from data and provide early warnings of network security breaches. These findings highlight AI's potential as a proactive, self-learning technology that continuously enhances its ability to detect and neutralize threats within national cyber monitoring and crisis response systems [3].

Deep learning – another subfield of AI – is a more advanced technique that uses multilayered neural networks to model complex relationships within data. Deep learning models have demonstrated high effectiveness in detecting advanced threats, including APTs (advanced persistent threats), malware, and other sophisticated incidents that can bypass traditional detection methods. Their ability to process and analyze large volumes of unstructured data, such as network traffic and system logs, makes them an optimal tool for protecting national infrastructure during crisis response scenarios.

The integration of artificial intelligence into cloud monitoring systems enables a powerful combination of scalability, real-time analysis, and adaptive learning. AI algorithms can continuously monitor an entire infrastructure, detecting and neutralizing threats as they arise. This approach reduces the need for human



intervention and allows national response teams to focus on more complex tasks, such as handling large-scale incidents and actively hunting threats [10].

Hybrid AI systems that combine various machine learning techniques are becoming increasingly popular in national cyber monitoring. For example, a system that combines supervised and unsupervised learning methods can improve the accuracy of threat detection in dynamic environments [5]. This combination enhances the generalization and resilience of models, making them particularly suitable for use in national crisis incident management systems.

Despite these advances, practical implementation of AI in national cyber monitoring still faces challenges, particularly with regard to data integration and real-time performance. In a study by Chirag Tiwari (2020), it was noted that integrating AI models with legacy systems in national security infrastructure is complex, as traditional cybersecurity protocols may be incompatible with AI-based tools. The integration process often involves overcoming barriers related to data isolation, technical system incompatibilities, and organizational inertia [8].

In addition, the use of AI in real-time requires high computational power and low latency, which places extra demands on resources in large-scale cyber operations. In their study, Ofusori, Lizzy; Bokaba, Tebogo; and Mhlongo, Siyabonga emphasized the need for high-performance computing (HPC) systems to effectively run AI models, particularly those requiring substantial data for training and inference. This challenge is further complicated by the need for real-time decision-making, where delays can lead to serious security breaches [5].

One of the key problems is the need for large volumes of labeled data to effectively train predictive models. In the context of national cyber monitoring and crisis response, acquiring high-quality labeled data is often hindered by privacy concerns, data fragmentation, and the constant evolution of threats [7].

Another major concern is the interpretability of AI models, especially those based on deep learning, which are often referred to as “black boxes.” The lack of transparency in decision-making complicates their use in critical areas where human oversight is required. To address this, recent studies have proposed the use of explainable AI (XAI),



which clarifies the decision-making process of the model, increasing its trustworthiness and practical value for professionals involved in national cyber monitoring and incident management. These approaches help bridge the gap between high-performance AI models and the need for transparency, allowing operators to make informed decisions based on insights provided by AI.

Based on the reviewed literature, the key challenges in implementing artificial intelligence in national cybersecurity systems can be summarized as follows (Table 3).

Table 3 – Key challenges in implementing artificial intelligence in national cybersecurity systems

Challenge	Explanation	Impact on security
False positives and false negatives	AI models may incorrectly identify safe activity as a threat or fail to detect actual threats.	Increased response time, risk of missed threats.
Integration with legacy systems	National infrastructure often relies on outdated systems that are incompatible with modern AI solutions.	Implementation becomes more complex and costly.
Data privacy and ethics	The use of AI may raise concerns about data collection and privacy violations.	Risk of personal data leaks and loss of public trust.
Complexity of AI model training	AI models require large and diverse datasets as well as continuous retraining.	High resource demand, risk of model obsolescence.
Allocation of resources for AI-based security	Implementing AI-based protection requires significant resource investment.	Budget constraints may hinder adoption, especially in smaller regions.
Scalability of AI models for large systems	AI models must be capable of processing large volumes of data.	System performance may decline as monitoring expands.
Human expertise for AI implementation and management	Skilled personnel are needed to deploy, monitor, and manage AI systems.	Shortage of experts may slow down implementation and usage of AI.

Note: systematized by the author based on [10]

Among the key challenges identified in the implementation of artificial intelligence in national cybersecurity systems, the issue of human resources stands out as particularly critical. The application of such technologies requires the involvement of highly qualified professionals who possess not only deep knowledge in programming and artificial intelligence but also an understanding of the functioning of



the national economy, critical infrastructure, and the interdisciplinary nature of public administration. This means that the next generation of cybersecurity specialists must have a broader range of competencies than those required in earlier stages of digital development.

Accordingly, the successful deployment of such systems must begin with the development of human capital – through education, retraining, and the fostering of professional communities. In countries with underdeveloped economies and weak educational infrastructure, sourcing such specialists may become a significant constraint. However, states that are already investing in educational programs, centers of excellence, and research initiatives in AI and cybersecurity will, in the long term, be better positioned to integrate effective, adaptive, and resilient protection systems capable of addressing modern threats. Given the projected rapid acceleration in the development of artificial intelligence technologies, the coming years will open new opportunities to strengthen the protection of government information systems, critical infrastructure, and digital sovereignty more broadly. This is why states must begin preparing for these challenges now by establishing the institutional, human, and scientific foundations necessary for future technological security [4].

Conclusions

National cyber monitoring and crisis incident management systems are integral components of the modern national security architecture, as they enable states to detect, prevent, and respond swiftly to incidents in the digital environment. A defining feature of these systems is the need for continuous monitoring of information flows, user behavior, network interactions, and potentially malicious activity within the infrastructure. Over the past decades, the concept of cybersecurity has evolved — from basic signature-based solutions (such as antivirus software and firewalls) to advanced predictive systems grounded in deep analysis of big data. This shift has been driven by the need to adapt to dynamic, high-tech threats increasingly targeting critical national assets.

The advancement of artificial intelligence (AI) technologies has significantly expanded the capabilities of crisis response. Modern solutions are built on machine



learning (ML), deep learning, reinforcement learning, convolutional neural networks (CNN), and hybrid AI models that combine various analytical and classification techniques. These technologies enable behavioral analytics, detection of hidden attack patterns, real-time system log analysis, and automated incident response. A particularly important aspect is the integration of AI into cloud monitoring systems, which ensures scalability, high-speed data processing, and reduced reliance on human intervention in the response process.

At the same time, despite these evident advantages, the effective implementation of AI in national cyber monitoring systems faces a number of challenges. The most pressing among them remains the shortage of specialists capable of developing, deploying, and maintaining AI-driven solutions in the field of cybersecurity.

References

1. Carr M. Public-private partnerships in national cybersecurity strategies. *International Affairs*, 2016, №92(1), 43–62. URL: <https://doi.org/10.1111/1468-2346.12504>
2. Davydiuk A., Potii O. National Cybersecurity Governance: Ukraine. Tallinn, 2024. National Cybersecurity Governance Series. URL: <https://ccdcoe.org/uploads/2024/08/National-Cybersecurity-Governance-Ukraine-Davydiuk-Potii-2024.pdf>
3. Gupta N., Jindal V., Bedi P. LIO-IDS: Handling class imbalance using LSTM and improved one-vs-one technique in intrusion detection system. *Computer Networks*, 2021, №192, 108076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108076>
4. Kim Y.-J., Lee S.-Y., Kwon H.-Y., Lim J. A Study on the Improvement of Effectiveness in National Cyber Security Monitoring and Control Services. *Journal of the Korea Institute of Information Security and Cryptology*, 2009, №19. URL: https://www.researchgate.net/publication/264141653_A_Study_on_the_Improvement_of_Effectiveness_in_National_Cyber_Security_Monitoring_and_Control_Services
5. Ofusori L., Bokaba T., Mhlongo S. Artificial Intelligence in Cybersecurity: A Comprehensive Review and Future Direction. *Applied Artificial Intelligence*, 2024, №38. URL: <https://doi.org/10.1080/08839514.2024.2439609>



6. Rahman M.K., Dalim H. AI-Powered Solutions for Enhancing National Cybersecurity: Predictive Analytics and Threat Mitigation. 2023, №14, 1036–1069.

URL: [https://www.researchgate.net/publication/387269707_AI-Powered Solutions for Enhancing National Cybersecurity Predictive Analytics and Threat Mitigation](https://www.researchgate.net/publication/387269707_AI-Powered_Solutions_for_Enhancing_National_Cybersecurity_Predictive_Analytics_and_Threat_Mitigation)

7. Santisteban A., Ocares-Cunyarachi L., Andrade-Arenas L. Analysis of National Cybersecurity Strategies. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2020, №11. URL: <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0111288>

8. Tiwari C., Pillai S., Obaid A.J., Saear A.R., Sabr A.K. Integration of artificial intelligence/machine learning in developing and defending web applications. AIP Conference Proceedings, 2021, №2736, 060038-1–060038-5. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0171097>

9. Tomar S., Singh P. Cyber Security Methodologies and Attack Management. Journal of Management and Service Science (JMSS), 2021, №1, 1–8. URL: <https://doi.org/10.54060/JMSS/001.01.002>

10. Venkatesan K., Prasad M. Enhancing Cybersecurity for National Infrastructure Through AI-Powered Cloud Monitoring Systems. 2025. URL: [https://www.researchgate.net/publication/388178026_Enhancing Cybersecurity for National Infrastructure Through AI-Powered Cloud Monitoring Systems](https://www.researchgate.net/publication/388178026_Enhancing_Cybersecurity_for_National_Infrastructure_Through_AI-Powered_Cloud_Monitoring_Systems)



UDC 656.13

INCREASING INFORMATION AT INTERSECTIONS WITH THE ORGANIZATION OF A SPLIT PHASE DISTRACTS

Prokhorchuk M.

Senior Lecturer

Department of Automotive and Transport Engineering

Zhytomyr Polytechnic State University

ORCID 0000-0003-1154-6589

Abstract. The article deals with the problems of traffic safety at intersections equipped with traffic signal control, where the time of the permitted signal on one street may have different duration on the approaches to the intersection. This method of organizing a phased junction is effective in cases where there is a significant difference between the traffic intensity on the approaches to the intersection, and the geometry of the roadway does not allow the introduction of a third phase for organizing left turns. This method is also effective in reducing traffic delays at the intersection of large buses and trolleybuses turning left. The article points out such a well-known drawback of this method as the lack of information from drivers about traffic signals in the oncoming lanes. An analysis of the accident rate at intersections with the organization of a split-phase junction in Zhytomyr carried out. Statistical data provided by the Office of the Patrol Police of Ukraine in Zhytomyr regarding road accidents with victims and fatalities that occurred at the studied intersections, data on road accidents with material damage obtained from open sources, in particular Zhytomyr.info, are presented. The results of a survey of professional drivers on their opinion about the need to improve information summarizing. The survey involved drivers of trolleybuses and buses of the Zhytomyr Tram and Trolleybus Department and truck drivers of the companies Humax and Gladkiy in Zhytomyr. Zhytomyr. The generalized survey data indicate the need to introduce additional information devices to indicate intersections where the permitted signal time is different for different directions. As a solution to the problem of increasing the information content at intersections with the organization of a split-phase crossing, proposing to introduce a static sign to be installed on the approaches to the intersection and the use of dynamic boards that would duplicate the signals of traffic lights on the oncoming lane.

Keywords: traffic light control, split phase, accident rate, road accidents, asynchronous operation of traffic lights, control phases, traffic light cycle, information content, intersection.

Introduction.

Intersections are the most important part of the city's street and road network. The efficient functioning of the street and road network depends on the operation of the intersection. Methods of traffic management at intersections should be aimed at providing safe crossing conditions for all road users, as well as at reducing traffic delays when passing through the intersection, as delays lead to economic costs and increased harmful emissions. [1]

To organize safe traffic at an intersection, traffic lights are most often used. The introduction of traffic light control is advisable at a certain ratio of traffic intensity on



the main and secondary roads. Traffic light control minimizes the number of conflict points, helps to reduce delays for road users, and reduces the negative impact on the environment.

An important stage in the introduction of traffic signal control is to determine the number of control phases. The maximum number of phases ensures a minimum of conflict points for the regulated directions, but increases the cycle time and the total duration of additional cycles. Therefore, when determining the number of phases, the specific conditions at the intersection (number and type of conflict points, traffic volume, intersection geometry, etc.) should take into account [1].

The simplest is the two-phase traffic signal cycle. When using a two-phase cycle, left-turning maneuvers carried out in conflict with the forward direction, so at a certain intensity, significant delays in the movement of the left-turning direction may occur.

The literature [1, 2] regulates the expediency of introducing the third phase at a left-turning intensity of 120 units/h. However, if the width of the roadway is insufficient, or if the intensity of traffic in the opposite directions differs significantly, a split phase is introduced, which gives vehicles time to make a left turn at high intensity of oncoming traffic. There are two methods of phase separation: the delayed start method and the early cutoff method.

A significant disadvantage of this method is the lack of information about the traffic signal in the oncoming lane [1]. Therefore, the object of study of the article is the intersections of Zhytomyr city, where a split-phase intersection is organized using the split-phase method. The purpose of the study is to analyze the accident rate at a given intersection and develop proposals to eliminate the shortcomings of this method.

Main text

The split-phase method is primarily implemented within a two-phase signal cycle, without the inclusion of a third signal phase. Instead, a phase-like element utilized. Within such a two-phase cycle, left- and right-turning maneuvers, as well as pedestrian crossings, occur under conditions of conflict with other traffic streams [1]. The integration of split-phase mechanisms into the two-phase cycle does not eliminate these conflicts; thus, turning maneuvers continue to intersect with opposing or crossing



movements. The resulting conflict points at the intersection under a two-phase signal regime are illustrated in Figure 1..

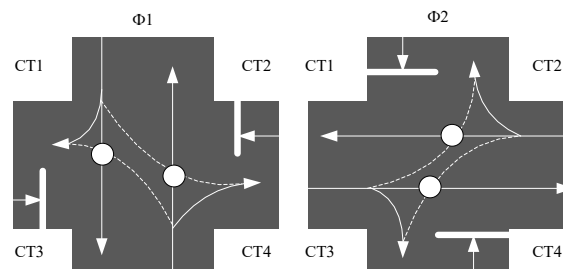


Figure 1-Conflict points in the two-phase cycle of traffic light control

When applying the split phase using the early cutoff method, , since traffic is allowed in only one direction.

In certain instances, a potentially hazardous situation may arise wherein drivers executing a left turn (from direction AB as illustrated in Figure 2), originating from a direction where the green signal duration has been shortened (section A in Figure 2), enter the intersection but are unable to complete the turn before the signal changes. Upon observing the onset of a yellow signal, these drivers may attempt to expedite the completion of their maneuver. However, being unaware that the green signal remains active for oncoming traffic—permitting movement in all directions—they may execute the turn hastily without yielding to vehicles proceeding straight through the intersection on a green signal, thereby increasing the risk of a traffic collision.

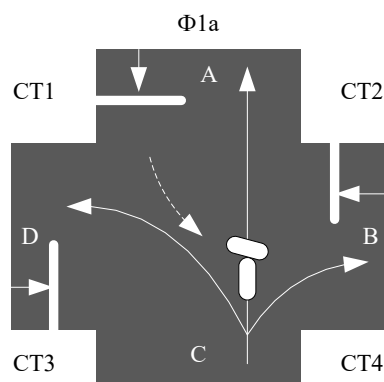


Figure. 2 - Scheme of a possible accident



According to the Zhytomyr City Council, the organization of a split-phase traffic junction is used at the intersections of Velyka Berdychivska Street and Shevchenko Street, Velyka Berdychivska Street and Zhuika Street, Kyivska Street and Nebesna Sotnya Street, Skhidna Street and Nezalezhnosti streets. At these intersections, a phased crossing organized using the early cutoff method. Figure 3 shows a diagram of one of the intersections, the others have similar geometric parameters.

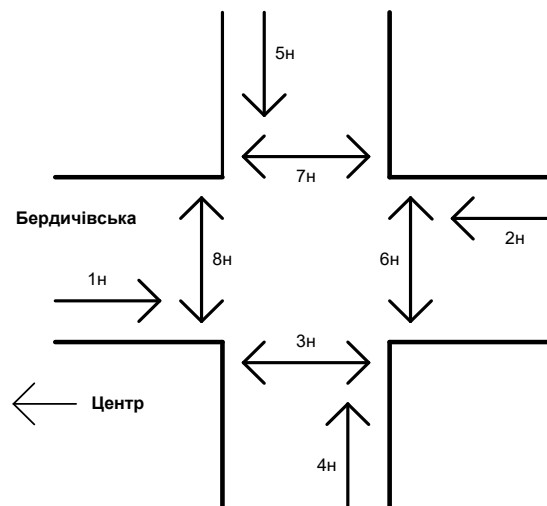


Figure 3 - Traffic pattern of cars and pedestrians through the intersection of V. Berdychivska and Zhuyka streets

The traffic signal operation cyclogram is shown in Figure 4. In the first phase of the control, the permitted signal is extended in direction 2 so that the left-turning direction has time to complete the maneuver.

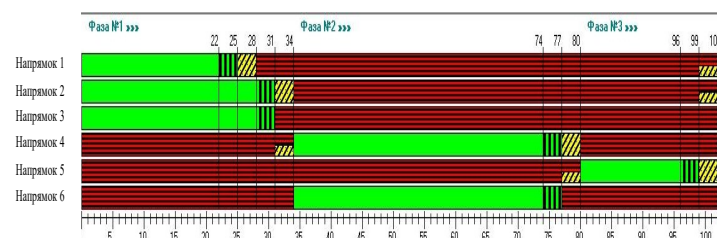


Figure 4 - Traffic signal operation cyclogram at the intersection of V. Berdychivska and Shevchenko streets



According to the information provided by the Patrol Police Department, the following number of road accidents occurred at the study intersections over the period of 10 months in 2024, according to the scheme shown in Figure 4: Velyka Berdychivska and Shevchenka - 3; Velyka Berdychivska and Zhuika - 2; Kyivska and Nebesna Sotnya - 2; Skhidna and Nezalezhnosti - 3. Open sources, such as Zhytomyr.info, also revealed cases of road accidents with material damage, in particular at the intersections of Velyka Berdychivska and Shevchenka - 4; Velyka Berdychivska and Zhuika - 5; Kyivska and Heavenly Hundred - 4; Skhidna and Nezalezhnosti - 3.

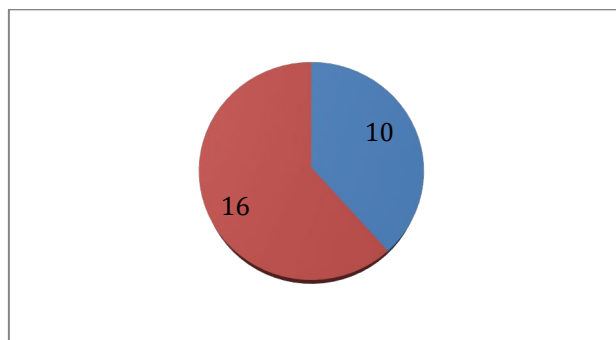


Figure 5 - Number of accidents at intersections in Zhytomyr, with the organization of a split-phase method for 10 months of 2024

People also leave complaints about the non-synchronous operation of the traffic lights, and there are complaints on Zhytmyr.info in the comments to accidents, specifically about the operation of the traffic lights at the V. Berdychivska-Zhuika intersection.

According to the above statistics, it can be concluded that drivers' lack of awareness of the traffic signal in the oncoming lane can lead to accidents.

Based on the statement that the driver is the controlling link in the traffic system of vehicles, which specifically determines the direction and speed of vehicles at each moment of vehicle movement. The more fully and clearly drivers are informed about the conditions and necessary traffic modes, the more accurate and error-free the driving actions of drivers are, and therefore the higher the level of road safety and efficiency



[3]. A survey of professional drivers was conducted regarding the organization of a split-phase interchange organized by the split-phase method. Drivers were asked to answer two questions and had multiple choice answers. Before the survey, a brief explanation of the problem under study was given: “There is a certain organization of traffic light control, in which traffic lights on one road do not work synchronously in different directions. The green light may be extended in one direction and shortened in the other. This is usually using to allow vehicles to turn left and is effective in many cases. However, the disadvantage of this organization is that drivers are not informed about the traffic signal in the opposite lane. Please provide answers to the questions regarding this organization of the traffic signal facility”, and then two questions were provided:

1. Do you think that non-synchronous operation of traffic lights can lead to an accident? Answer options “Yes”, “No”, “My own version”

2. Is there a need to increase information for drivers at intersections where traffic lights do not work synchronously? Answer options: “Yes”, “No”, “My own version”

The survey conducted among truck drivers of the companies in the private enterprise “Yumaks” and “Gladkyi” and drivers of trolleybuses and buses of the tram and trolleybus department of Zhytomyr. A total of 23 truck drivers took part in the survey. The first question was answered by 75 percent of respondents, while 25 percent did not think an emergency situation was possible.

Regarding the second question, 90% of respondents believe it is necessary to increase information at intersections.

Similar results obtained among bus and trolleybus drivers. A total of 40 drivers took part in the survey. Regarding the first question, 56 percent agreed with the possibility of an accident, 35 percent disagreed, and 9 percent gave their answer. Regarding the second question, 80% of drivers agreed that it is necessary to increase the level of information at intersections where split-phase traffic is organized. 15% of respondents do not see the need for this, 5% provided their own answer, in particular, they suggested the need to inform drivers about the traffic signal in the oncoming lane.



Summary and conclusions. .

Despite its identified limitations, the phase splitting method offers significant advantages over a conventional two-phase signal cycle, particularly in scenarios characterized by uneven traffic intensities across different directions. This is especially relevant when certain vehicles are unable to complete left-turn maneuvers within the available signal time (as illustrated in Figure 4, direction CD), and the implementation of a dedicated turning lane is not feasible due to geometric constraints of the roadway. Furthermore, the phase splitting approach proves effective in intersections involving tram and trolleybus traffic control. Notably, it facilitates a reduction in tram delays by up to 50% and contributes to the optimization of the signal timing ratio between conflicting vehicular and pedestrian traffic flows. Consequently, this results in a 6% increase in the average ratio of permissive signal duration to the total signal cycle time [2].

Therefore, this method of organizing a phased junction should not be rejected, but in order to improve traffic safety at intersections with split phases, it is worth introducing information signs that would attract the attention of drivers when approaching an intersection with such an organization of traffic signal control. It is also possible to install spherical mirrors that would display the signal group of the oncoming traffic lane, or information boards that would duplicate the signals of traffic lights on the oncoming lane.

References

1. Polishchuk V.P. Organization and regulation of road traffic. - K.: Znannya Ukrainy, 2014. - 467 p.
2. Traffic management at regulated intersections in cities: monograph / E.Y. Fornalchyk, I.A. Mohyla, V.E. Trushevsky, V.V. Gilevich; edited by E.Y. Fornalchyk - Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2018. - 236
3. Organization of traffic: a textbook / A.A.Kashkanov, V.P.Kuzhel.-Vinnytsia: VNTU, 2017.-125p.



4. Prokhorchuk M. Problematic aspects of the organization of phase separation of vehicles using a split phase. Innovative technologies for the development of mechanical engineering and the efficient functioning of transport systems. Proceedings of the Fifth All-Ukrainian Scientific and Technical Internet Conference. October 25-27, 2023, Rivne, pp. 133-134.

Article sent: 04.05.2025

© Prokhorchuk M.V



UDC 004.94, 624.012.35

INVESTIGATION INTO AI-ASSISTED OPTIMIZATION OF THIN-WALLED CROSS-SECTIONS

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТОНКОСТІННИХ ПОПЕРЕЧНИХ ПЕРЕРІЗІВ
ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Oleksandr Movchan / Мовчан О.Ю.

asp. / асп.

ORCID: 0009-0002-4430-683X

Hryhorovych Mykyta / Григорович М.С.

applicant. / здобувач.

ORCID: 0000-0002-5539-7493

Kostiantyn Dikarev / Дікарев К.Б.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-9107-3667

Alona Kutsenko-Skokova / Куценко-Скокова А.О.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-0443-0222

Ukrainian State University of Science and Technologies,

Dnipro, Architect Oleh Petrov str. 24a, 49005

Український державний університет науки і технологій,

м. Дніпро, вул. Архітектора Олега Петрова 24а, 49005

Abstract Cross-section selection determines the optimal geometry and material of beams, columns, trusses, and slabs to satisfy strength, stiffness, serviceability, and code requirements. Traditional methods analytical formulas, empirical code provisions, finite element analysis, and the finite strip method are reliable but often time-consuming and conservative. Artificial intelligence (AI) offers rapid design-space exploration, identification of non-intuitive solutions, and accelerated workflows that augment rather than replace engineer expertise.

A variety of AI methodologies have been applied to cross-section design. Supervised learning models artificial neural networks, support vector machines, Gaussian process regression, and ensemble trees train on paired input-output data to predict performance metrics such as critical buckling loads, ultimate strength, and deflections in milliseconds, while uncertainty estimates guide risk-informed decisions. Reinforcement learning frames section assignment as a sequential decision process, with graph-based and multi-agent architectures achieving faster convergence and greater weight reductions than classical optimizers. Evolutionary algorithms, particle swarm optimizers, and generative adversarial networks explore mixed continuous and discrete variables to deliver flexible, multi-objective solutions. Hybrid physics-informed models embed equilibrium and stability equations into training pipelines or leverage derived features slenderness ratios and section moduli to enhance robustness, interpretability, and regulatory acceptance.

In conventional structural systems planar and three-dimensional frames, trusses, and shear walls AI-driven workflows yield measurable benefits. Graph-based reinforcement learning has reduced total steel weight by up to 12 percent compared to particle swarm or simulated annealing, while surrogate-based pipelines use neural networks or Gaussian process models to propose near-optimal member sizes in milliseconds, bypassing hours of finite element analysis. Integrated design-co-pilot platforms combine generative algorithms with automated code compliance checks to generate member-sizing proposals over ten times faster than manual methods, with deviations below 20 percent.



Thin-walled elements present additional complexity due to interacting buckling modes and nonlinear behavior. AI surrogates trained on finite-strip or finite-element datasets achieve R^2 values above 0.98 for buckling-load prediction and classify failure modes with over 95 percent accuracy. Gaussian processes and ensemble methods furnish predictive variances that support confidence-weighted decisions. Inverse-design frameworks coupling surrogates with genetic or swarm optimizers generate optimized profiles within 5 percent of validation targets. Symbolic regression yields explicit design equations suitable for incorporation into codes.

Permanent formwork systems which serve as both construction support and structural elements pose a multifaceted optimization challenge that spans structural support, thermal insulation, acoustic attenuation, fire resistance, and constructability. AI-augmented surrogates, inverse-learning loops, and generative networks can rapidly evaluate thousands of candidate profiles. Hybrid AI-FEA workflows shortlist top candidates for detailed simulation, apply AI-based validation checks to detect input inconsistencies, and iteratively refine surrogate accuracy through closed-loop retraining.

Despite these advances, critical gaps remain comprehensive case studies in active infrastructure, alignment with existing codes, transparent reporting of failure modes, long-term durability data, unified uncertainty quantification, and resilience under extreme loads. Addressing these gaps through interdisciplinary collaboration among structural engineers, AI researchers, software developers, and regulatory bodies will be essential to establish AI-driven cross-section optimization as a reliable, industry-standard practice in modern structural engineering.

Keywords: Artificial intelligence, Machine learning, Permanent formwork, Cross-section optimization, Surrogate modeling, Generative Design, Physics-informed neural networks, multi-fidelity data integration, Structural health monitoring, Hybrid AI-FEA workflows.

Introduction

Cross-section selection, which involves choosing the size, shape, and material of structural members such as beams, columns, trusses, and slabs, constitutes a fundamental task in structural engineering design. An optimal selection ensures safe and economical load-carrying capacity, compliance with serviceability requirements, and adherence to relevant codes. Traditional practice relies on analytical formulas, empirical provisions from standards such as Eurocode, AISC, and ACI, alongside iterative numerical techniques including finite element analysis and the finite strip method. Although these methods are well established, they often demand extensive computational time, expert judgment to address complex stability issues such as local, distortional, and global buckling, and tend toward conservatism to guarantee safety.

Recent advances in artificial intelligence, particularly in machine learning, reinforcement learning, evolutionary algorithms, and generative design, have introduced powerful decision-support tools that augment but do not replace the engineer's expertise. These AI-based approaches rapidly explore expansive design spaces, uncover non-intuitive solutions, and accelerate iterative workflows. For instance, graph-based reinforcement learning agents have been shown to assign



standard steel sections in frame structures with reduced total weight and computational expense relative to particle swarm or simulated annealing optimizers [2]. Multi-agent systems further extend these benefits to three-dimensional building frames, achieving faster convergence toward minimum-volume configurations than classical metaheuristics, while industry applications report material savings of 18-25 percent without compromising code compliance [4].

Surrogate models based on supervised learning, such as artificial neural networks trained on harmony-search-optimized datasets, can predict near-optimal member dimensions in fractions of a second compared to the hours or days required by traditional methods. Fully automated “design co-pilot” platforms integrate generative AI directly into structural workflows, producing complete sizing proposals for reinforced-concrete shear walls over ten times faster than manual design, with deviations from expert solutions typically below 20 percent [8].

Thin-walled elements pose additional challenges due to their sensitivity to complex buckling interactions, including local flange buckling, distortional web-flange modes, and global flexural-torsional instabilities. Data-driven models trained on finite strip or high-fidelity finite element datasets have demonstrated excellent predictive accuracy: artificial neural networks forecasting critical buckling loads of cold-formed steel channels achieve coefficients of determination up to 0.98, and deep belief networks surpass traditional web-crippling equations, enabling the derivation of refined design formulas [18].

Inverse design frameworks coupling trained surrogates with genetic algorithms or particle swarm optimizers allow engineers to specify target performance criteria, such as a desired buckling capacity, and obtain optimized geometric parameters that agree within 5 percent of FEA validation. Moreover, gene expression programming and multi-gene symbolic regression produce interpretable equations suitable for incorporation into design codes [14].

Despite these promising developments, barriers to widespread AI adoption persist. High-quality training data are often proprietary or narrowly scoped, limiting model generalization to novel geometries and loading conditions. The opacity of many



machine learning models raises concerns regarding interpretability and regulatory acceptance, while professional liability and code compliance demand design outputs that are both accurate and verifiable through conventional calculations or experimental testing. Integrating AI tools into established workflows encompassing BIM platforms, FEA packages, and project management systems also requires intuitive interfaces and robust data interoperability.

This review synthesizes the body of work on AI-assisted cross-section selection in civil and structural engineering, surveying methods applied to conventional beam-column and frame systems as well as thin-walled members. It highlights performance gains in material efficiency, design speed, and safety compliance, and critically examines challenges related to model interpretability, data quality, and workflow integration. To advance the field, we advocate embedding physics-informed constraints directly into learning pipelines, integrating multi-fidelity datasets that combine analytical models with high-resolution simulations, implementing dynamic model updating through real-time structural monitoring, and incorporating uncertainty quantification techniques such as Bayesian neural networks and Monte Carlo dropout to accompany predictions with confidence intervals.

Finally, we explore the potential of AI-FEA hybrid workflows for permanent formwork systems, which function both as construction formwork and as finished structural elements. By optimizing cross-sectional profiles for structural performance, thermal insulation, fire resistance, and constructability and by leveraging predictive models for long-term durability AI-augmented design promises to establish new standards in next-generation structural engineering practice.

AI Methodologies for Cross-Section Design and Analysis

The application of artificial intelligence to structural cross-section design and analysis leverages a diverse set of algorithmic approaches. Four principal methodological categories have emerged supervised learning, reinforcement learning, evolutionary and generative algorithms, and hybrid physics-informed models each offering distinct advantages for predicting performance metrics, automating decision processes, exploring vast design spaces, or embedding fundamental physical laws. The



following section summarizes the core principles, representative implementations, and comparative strengths and limitations of these approaches, with pointers to the original research where appropriate.

Supervised Learning. Supervised learning methods train predictive models on paired examples of section geometry, material properties, loading conditions, and corresponding performance outcomes. Once trained, these models deliver near-instantaneous predictions of metrics such as critical buckling loads or ultimate strength. Typical implementations include multi-layer perceptron neural networks, support vector machines, Gaussian process regressors, and ensemble methods such as random forests or gradient boosting. For example, feed-forward neural networks trained on finite-strip analyses of cold-formed steel channels achieved coefficients of determination around 0.98 in predicting buckling loads and correctly classified local, distortional, and global failure modes without iterative eigenvalue solves [12]. Similarly, an ANN trained on 2 800 experimental and simulated compression and impact tests of thin-walled tubes demonstrated $R^2 \approx 0.86$ on unseen profiles, confirming its generalizability [11]. In fire scenarios, ANN, SVM, and random forest models outperformed Eurocode equations for slender I-beams by accurately capturing temperature–buckling interactions [10]. A Gaussian process surrogate trained on 280 finite-element simulations of cold-formed tubular columns delivered higher capacity-prediction accuracy than conventional formulas [1, 19]. The primary strengths of supervised learning lie in its inference speed and high fidelity when ample, high-quality training data are available, along with the ability to quantify uncertainty via Bayesian extensions. Limitations include reliance on dataset diversity which may restrict applicability to novel geometries or load cases and the “black-box” opacity of deep networks, although interpretability techniques such as SHAP are increasingly applied to mitigate this issue.

Reinforcement Learning. Reinforcement learning frames cross-section selection as a sequential decision problem in which an agent explores actions such as choosing or resizing members in a simulated structural environment, and receives rewards based on objectives like weight minimization or compliance with code provisions. Graph-



based RL agents treat structural layouts as graphs with joints as nodes and members as edges, enabling the agent to respect connectivity and load paths naturally. Multi-agent architectures further accelerate convergence by assigning distinct roles one agent may select which member to modify while another chooses the section profile. In planar steel frames, a graph-based agent reduced final weight and computational cost compared to particle swarm optimization [2]. Extension to three-dimensional frames via a two-agent system produced minimum-volume designs more rapidly than simulated annealing or local search [3]. Reward functions in these studies explicitly integrated buckling and code compliance constraints, ensuring safety alongside material efficiency. Reinforcement learning excels when optimizing from discrete catalogs of standard profiles and can incorporate complex performance metrics directly into its objective, but its training phase can be computationally intensive, and the resulting policies often remain difficult to interpret without supplementary analyses.

Evolutionary and Generative Algorithms. Evolutionary and generative methods draw inspiration from natural processes, biological evolution, swarm behavior, or thermal annealing to search continuous and discrete design spaces. Genetic algorithms evolve populations of candidate cross sections through selection, crossover, and mutation; particle swarm optimization moves design vectors according to individual and collective best positions; simulated annealing accepts probabilistic perturbations to escape local minimum; and generative adversarial networks learn to produce novel geometries by pitting two neural networks against each other. Comparative benchmarks indicate that reinforcement learning can outperform PSO in weight reduction and convergence speed, yet PSO remains an effective baseline optimizer. Hybrid frameworks that couple GA with ANN surrogates have optimized lipped channel sections for web-crippling loads, yielding designs superior to standard code recommendations [20]. Emerging GAN-based workflows propose unconventional perforated or nonstandard profiles that satisfy structural criteria while expanding the design vocabulary. Symbolic regression via gene expression programming has also generated explicit formulas for GFRP hollow-section web-crippling capacity, providing interpretable equations grounded in numerical data [14]. These algorithms



offer flexibility in handling mixed variable types and multi-objective problems, and symbolic approaches enhance interpretability; their drawbacks include significant computational demands for high-dimensional searches and sensitivity to parameter tuning.

Hybrid and Physics-Informed Models. Hybrid methodologies integrate data-driven learning with physical principles to improve robustness, interpretability, and regulatory acceptance. Physics-informed neural networks enforce equilibrium and buckling differential equations within the training loss, guaranteeing that predictions obey fundamental laws even for out-of-sample geometries. Surrogate models enriched with engineered features such as section moduli or slenderness ratios leverage both raw inputs and analytically derived parameters. Symbolic regression techniques evolve human-readable design formulas that practitioners can adopt directly. To advance these approaches, researchers propose multi-fidelity integration of analytical approximations with high-fidelity simulations or experiments to balance training cost and accuracy, dynamic model updating using real-time structural monitoring data for lifecycle adaptation and embedding Bayesian neural networks or Monte Carlo dropout for uncertainty quantification alongside point estimates. Applications of physics-informed models include guaranteed-constraint buckling capacity prediction and surrogate-based optimization pipelines that replace thousands of finite-elements runs with millisecond-scale inferences. The main challenges involve the complexity of PINN implementations requiring careful weighting of physics versus data losses and the computational overhead of multi-fidelity training and frequent retraining.

Supervised learning delivers rapid, accurate predictions when comprehensive labeled data exist; reinforcement learning excels in discrete-catalog optimization under multifaceted constraints; evolutionary and generative algorithms offer flexible, multi-objective search capabilities; and hybrid physics-informed models marry data-driven inference with analytical rigor to enhance trust and generalization. Collectively, these methodologies constitute a complementary toolkit for AI-augmented cross-section design and analysis, charting a course toward more efficient, innovative, and verifiable structural engineering workflows.



Performance and Cost Optimization

Early demonstrations of AI's value in conventional structures focused on minimizing material usage while satisfying strength and serviceability requirements. In a landmark study [2] trained a graph-based reinforcement learning agent to assign standard steel sections to planar frame elements, achieving a lighter overall structure and faster convergence than a particle swarm optimizer, without compromising code compliance. Beyond academic benchmarks, AI-driven generative design platforms have been deployed on real infrastructure projects. For example, an AI-based generative algorithm optimized the geometry of a concrete bridge block in Pennsylvania, maintaining its load-bearing capacity while reducing material usage by 20%, which translated directly into lower procurement and transportation costs. Across multiple industry trials, firms have reported material procurement reductions of 18-25%, a benefit attributable to AI's ability to fine-tune cross-section shapes and dimensions more precisely than manual trial-and-error methods. Moreover, by integrating these tools early in the design phase, engineers can identify and eliminate unnecessary safety margins inherent in heuristic code provisions, yielding leaner sections that still satisfy ultimate strength, deflection limits, and vibration criteria. Multi-material optimization adjusting concrete strength, reinforcement ratios, or steel grades further balances performance and cost objectives, ensuring that AI-optimized solutions remain robust under both service loads and extreme events [9].

Design Efficiency and Time Savings. While material and cost gains are significant, AI integration also dramatically accelerates the design cycle. Traditional cross-section selection often involves numerous finite element or strip analyses, each iteration demanding hours of engineer time. Supervised-learning surrogates overcome much of this burden by learning from pre-computed, optimized designs. Bekdaş et al. [7] demonstrated that a neural network trained on harmony-search-optimized frame designs could ingest new geometry and loading conditions and output near-optimal member sizes in milliseconds, eliminating repeated optimization runs. Such surrogate models enable rapid “what-if” studies and real-time feedback during collaborative design sessions. Fully automated “design co-pilot” platforms represent the next



evolution in workflow augmentation. For instance, AI structure-Copilot at Tsinghua University combines generative design with automated code compliance checks; in a 2024 case study of a reinforced-concrete shear-wall building, the system produced member sizing proposals over ten times faster than a human engineer, with only a 20% deviation in weight distribution. These productivity gains allow engineers to focus on higher-order tasks conceptual design, architectural integration, and resilience planning while routine sizing is automated, fostering innovation and reducing project lead times.

Safety and Reliability Enhancements. Ensuring that efficiency gains do not compromise safety is paramount. AI methods embed stability and strength constraints directly into their optimization routines. In reinforcement learning frameworks, configurations that violate global or local buckling limits incur penalties during training, guiding the agent toward safe yet efficient designs. Consequently, RL-optimized frames achieve both material savings and rigorous code compliance. Machine learning models also enhance predictive accuracy where empirical code formulas struggle. For cold-formed steel members, Xu et al. [16, 19] trained a Gaussian process regression surrogate on finite element simulations of stainless-steel tubular columns, achieving higher accuracy and lower variability in capacity predictions than Eurocode and AISC equations; this improved confidence allows engineers to reduce conservatism in section selection. Deep learning approaches similarly advance predictions of web-crippling strength in perforated sections, outperforming traditional empirical relationships and informing updated design guidelines. Beyond strength criteria, multi-objective AI optimizations incorporate deflection limits, vibration performance, and seismic response into a unified framework. Generative algorithms can simultaneously optimize section dimensions to satisfy drift restrictions under lateral loads and stiffness requirements for dynamic performance, ensuring both comfort and durability. By evaluating numerous load combinations in parallel gravity, wind, seismic AI models support comprehensive performance-based design, enhancing reliability without extending design timelines.

In conventional structural systems, AI methodologies have delivered measurable benefits across performance and cost optimization, design efficiency, and safety



assurance. Reinforcement learning and generative design algorithms yield material-minimizing solutions that achieve 18-25% cost savings in practice. Supervised learning surrogates and design co-pilot platforms compress design cycles by an order of magnitude, enabling rapid exploration of alternatives and early-stage decision-making. Safety and reliability are strengthened through constraint-aware optimization and high-fidelity capacity prediction, resulting in lean, code-compliant cross-sections. These advances collectively pave the way for AI's adoption as a standard tool set in structural engineering practice.

AI in Thin-Walled Cross-Section Analysis and Optimization

Thin-walled structural members, including cold-formed steel channels, plate girders, and stainless-steel tubular columns, are valued for their high strength-to-weight ratios, yet their design involves intricate interactions among local, distortional, and global buckling modes that challenge both closed-form formulas and conventional numerical methods. Recent advances demonstrate that artificial intelligence techniques can accurately predict critical capacities, optimize cross-section geometry, and even derive novel design expressions for such members. This section considers four interrelated topics: machine learning-based prediction of buckling and strength, ultimate strength and fire-performance modeling, inverse design and optimization, and model performance with interpretability considerations [17].

Machine Learning-Based Prediction of Buckling and Strength. A central effort in recent research has been the development of supervised learning surrogates that map geometric and material descriptors directly to buckling loads and ultimate strengths, thereby replacing iterative eigenvalue analyses in finite-strip or finite-element frameworks. For example, feed-forward artificial neural networks trained on finite-strip data of cold-formed steel channels with inputs such as flange width, lip length, thickness, stiffener geometry, and effective length have achieved coefficients of determination around 0.98 on validation sets and correctly classified buckling modes with over 95 percent accuracy, effectively eliminating repeated eigenvalue solves [12]. Kernel methods and ensemble techniques have also proven effective: Gaussian process regression models trained on a few hundred finite-element simulations of tubular



stainless-steel columns reduced mean absolute error by 30 percent compared to Eurocode 3 formulas, while providing predictive variances for confidence-weighted decisions. Decision-tree ensembles such as Random Forests and gradient boosting machines capture nonlinear interactions among slenderness ratios, section moduli, and imperfection sensitivity factors, and their feature-importance metrics reveal the most influential geometric parameters, guiding targeted stiffening strategies and rapid stability assessments.

Ultimate Strength and Fire-Performance Modeling. Predicting ultimate capacity under combined axial-bending loads and elevated temperatures introduces additional complexity due to temperature-dependent stiffness degradation and nonlinear failure modes. Machine learning models trained on extensive finite-element datasets have outperformed empirical code equations in such scenarios. In one study, multiple algorithms including neural networks, support vector machines, random forests, and polynomial regressions were benchmarked against Eurocode fire provisions for slender I-beams under lateral-torsional buckling, achieving a 40 percent reduction in predictive error and capturing intricate interactions between thermal softening and buckling behavior [10]. Deep belief networks applied to web-crippling of perforated channels have likewise surpassed traditional empirical formulas, enabling the formulation of improved capacity expressions. For combined axial-bending failure, ensemble models trained on both experimental and simulated beam-column tests achieved coefficients of variation near 0.07 far below the 0.22-0.23 values of Eurocode 3 and AISC specifications thereby permitting reduced conservatism in design without sacrificing reliability [21]. By integrating temperature-dependent material models and multiple limit states into unified learning frameworks, AI approaches now support streamlined, performance-based design workflows that address serviceability, strength, and fire requirements concurrently.

Inverse Design and Optimization. Beyond forward prediction, inverse-design methodologies leverage trained surrogates in combination with evolutionary or swarm-based optimizers to prescribe target performance criteria and automatically generate optimal cross-section geometries. For instance, coupling an artificial neural network



surrogate with a genetic algorithm enabled engineers to specify a desired buckling capacity for rib-stiffened thin-wall structures and obtain geometric parameters that matched finite-element validation within 5 percent error, dramatically reducing the number of design iterations required. Hybrid metaheuristic frameworks that combine particle swarm optimization with neural-network surrogates have consistently outperformed code-based recommendations for cold-formed channels under web-crippling loads. Symbolic regression techniques, such as gene expression programming, further refine this process by evolving explicit mathematical formulas trained on extensive parametric datasets that relate geometry to capacity in a form immediately adoptable within design guidelines [14]. Together, these workflows accelerate the conceptual design phase by bridging performance targets and validated cross-section proposals without laborious manual sweeps.

Model Performance and Interpretability. High predictive accuracy alone does not guarantee engineering adoption; models must generalize to unseen geometries and provide transparency in their decision logic. Best practices include rigorous cross-validation, out-of-sample testing, and sensitivity analyses to ensure robust extrapolation. Transfer-learning strategies allow pre-trained networks to adapt efficiently to new section families, leveraging shared buckling physics to minimize additional data requirements. Explainable AI methods, such as SHapley Additive exPlanations, quantify the contribution of each input variable confirming, for example, that thickness and flange dimensions dominate buckling behavior while revealing subtle interactions among geometric parameters [12]. Embedding physically meaningful features such as slenderness ratios and section moduli into model inputs further enhances interpretability and reduces reliance on spurious correlations. Finally, uncertainty quantification techniques, including Bayesian neural networks and Monte Carlo dropout, produce prediction intervals that align with traditional reliability-based design frameworks, enabling engineers to apply informed safety margins alongside point estimates.

By uniting high-fidelity prediction, unified capacity modeling, inverse design workflows, and advanced interpretability, AI methods are redefining thin-walled cross-



section design. As datasets expand and physics-informed approaches mature, these tools are poised to become indispensable in practice, complementing and extending the capabilities of classical finite-element and code-based methods.

Case Studies and Practical Implementations

Academic Benchmarks. Academic research has established controlled benchmarks that validate AI-driven cross-section methods against traditional optimizers. In planar steel frames [2] applied a graph-based reinforcement-learning agent to a two-bay, two-story configuration and achieved an 8 percent reduction in total steel weight relative to a particle swarm optimizer while halving computational time. Takenaka et al. [3] extended this approach to three-dimensional building frames, using a multi-agent system that co-learned member selection and section assignment to deliver a 12 percent volume reduction compared to simulated annealing and local-search methods. Generative-design platforms such as AI structure-Copilot were benchmarked on reinforced-concrete shear walls by Qin et al. [8], who reported member sizing proposals meeting all code provisions with only a 20 percent deviation in weight from expert designs and an order-of-magnitude speedup. For cold-formed steel columns, Xu et al. [19] trained Gaussian process regressors on finite-element simulations of tubular stainless-steel members under axial load, producing coefficients of variation below 0.1 compared to 0.22–0.23 for Eurocode and AISC equations. Harmony-search-optimized truss designs have likewise been emulated by neural-network surrogates: Bekdaş et al. [7] achieved over 95 percent accuracy in predicting near-optimal member sizes for 10-bar and 25-bar trusses in under a millisecond, compared to minutes for iterative optimization. These studies confirm that AI methods can match or surpass classical approaches in both performance and computational efficiency, and they provide standardized models for reproducible algorithm comparisons.

Industry Tools and Pilot Projects. Commercial vendors and emerging start-ups are beginning to embed AI capabilities into structural analysis and design workflows. Autodesk's Robot Structural Analysis and Revit generative-design modules employ proprietary AI-inspired optimizers to suggest steel and concrete section sizes under



load and deflection constraints, with reported material savings of 10–15 percent on typical building projects. Tekla Structural Designer incorporates an automated steel-sizing routine that iterates finite-element checks with code compliance verifications, reducing manual rework by up to 30 percent in mid-rise office structures. Pathw.ai offers specialized AI services for steel connection design, using data-driven rule extraction to recommend bolt patterns, plate thicknesses, and weld sizes in seconds. Cloud-based AI services deliver optimized member recommendations and design rationales via remote APIs, though adoption is still limited by concerns over data privacy and liability; pilot projects at European infrastructure firms have demonstrated feasibility. In research settings, open-source frameworks built on TensorFlow and PyTorch interface with FEA packages (OpenSees, Abaqus) via scripting, enabling rapid prototyping of surrogates and inverse-design loops that bridge academia and industry [5, 6, 15].

Translation to Practice. Bridging AI research outputs and routine engineering practice involves converting model predictions into familiar design formats and integrating surrogates into established workflows. Symbolic regression techniques produce explicit, code-style equations that practitioners can adopt directly. Asghar et al. [14] used gene expression programming to derive a closed-form web-crippling equation for pultruded GFRP hollow sections, achieving mean absolute errors within 3 percent of finite-element data. Nguyen et al. [22] applied multi-gene genetic programming to cold-formed steel channels, generating formulas that improve upon AISI provisions for local and distortional buckling and include parameter tables and safety factors aligned with standard formats. Surrogate-based FEA workflows use trained ANNs, GPRs, or ensembles to prescreen candidate sections, reducing the number of high-fidelity analyses by approximately 80 percent while preserving design quality. AI-guided mesh refinement models identify critical regions in plate-girder simulations, delivering two- to threefold speed-ups with error bounds below 5 percent. Closed-loop optimization prototypes combine surrogates and FEA validation in an iterative cycle until convergence, merging AI's speed with numerical fidelity. Early BIM integrations allow AI models to import loads and boundary conditions directly



from the building model, perform surrogate evaluations, and export optimized section properties for documentation. These pathways demonstrate how AI can augment traditional processes automating routine tasks, expanding design exploration, and freeing engineers to concentrate on verification and innovation.

Rigorous academic benchmarks confirm that AI algorithms can rival or exceed classical optimizers in frames, trusses, and columns, delivering both material savings and computational efficiency. Industry tools from Autodesk and Tekla to specialized services like Pathw.ai are beginning to integrate AI into engineer workflows. Practical translation strategies, including AI-derived design equations and surrogate-based FEA pipelines, bridge the gap between research and practice. Continued collaboration among researchers, software vendors, and regulatory bodies will be essential to realize AI's full potential as a mainstream toolset in structural engineering.

Proposed Improvements and Future Research

Although AI-driven methods have demonstrated considerable promise in automating and optimizing cross-section design, key methodological gaps and industry barriers persist. We prioritize twelve enhancements and research directions, organized into four domains AI-based section selection, classical FEA integration, strategic real-world applicability, and regulatory and educational alignment each mapped to earlier recommendations.

AI-Based Section Selection Enhancements. Embedding structural mechanics directly into learning frameworks can improve model robustness beyond the training distribution. Physics-informed neural networks (PINNs) augment the loss function with equilibrium, compatibility, and buckling residuals, ensuring that predicted capacities satisfy governing equations by construction. For cold-formed steel channels, PINNs might penalize violations of shell stability conditions and Orr–Sommerfeld buckling criteria, markedly improving generalization to novel geometries and boundary conditions.

A multi-fidelity data pipeline further reduces data-generation costs and accelerates convergence. In such a scheme, a large corpus of low-fidelity data analytical buckling formulas, simplified beam-column interaction results, and coarse FEA outputs serves



for initial pretraining. Subsequent transfer-learning fine-tuning on smaller, high-fidelity experimental or detailed simulation datasets refines predictions while retaining the physics-informed structure.

To accommodate evolving materials and practices, dynamic model updating introduces online or incremental learning from streaming structural health monitoring (SHM) data strains, displacements, accelerations and periodic new FEA results. This continuous-learning paradigm adjusts network weights without full retraining, producing adaptive surrogates whose fidelity improves over a structure's service life.

Finally, uncertainty quantification is essential for safety-critical decisions. Bayesian neural networks with weight distributions, Monte Carlo dropout at inference, and deep ensembles can deliver predictive distributions rather than point estimates. Calibrated confidence intervals (e.g., 90 % or 95 %) allow engineers to apply explicit safety factors and support regulatory risk assessments.

Integration with Classical FEA. AI-driven simplification of FEA models can drastically reduce runtimes in early design stages. Surrogate predictors of stress gradients and buckling zones can guide adaptive mesh refinement resolving flange–web junctions with fine shell elements while coarsening mid-span regions thereby cutting FEA runtimes by 30–50 % with negligible loss of accuracy.

Automated validation classifiers, trained in historical FEA cases, can scan input decks for common setup errors unconstrained degrees of freedom, misapplied boundary conditions, inconsistent element formulations and flag them prior to simulation, reducing returns by up to 70 %.

AI-assisted exploration and visualization dashboards can present Pareto-optimal sets of cross sections balancing weight, cost, and safety indices in real time. By coupling rapid surrogate predictions with reduced-order FEA checks in a closed loop, engineers can interactively filter and compare hundreds of options within minutes, fostering innovation and avoiding locally confined choices.

Strategic and Real-World Applicability. The establishment of a standardized benchmarking framework including an open-access repository of thin-walled profiles, beam and frame assemblies, and high-fidelity FEA and experimental data will promote



reproducibility and fair algorithm comparisons. Defined metrics such as percentage weight reduction, computational time, and safety margins should be included, with periodic community challenges to drive advancement and regulatory dialogue.

Integrating AI with structural health monitoring closes the loop between design and operation. By feeding in-service SHM data (strain, acceleration, temperature) into anomaly-detection and model-updating algorithms, emerging damage or performance drift can be identified early, prompting maintenance or design reassessments. This synergy enhances resilience and supports lifecycle optimization of structural systems.

Regulatory and Educational Alignment. To secure formal acceptance of AI in safety-critical design, joint working groups of standards bodies (AISC, Eurocode committees), academics, and software vendors must define validation protocols, documentation requirements, and certification pathways. Specifying minimum dataset sizes, interpretability criteria, and safety-factor methodologies will embed AI outputs into recognized design codes.

Engineer-friendly explainable AI (XAI) tools integrated as plugins in mainstream CAD and FEA software should provide interactive dashboards that employ SHAP, LIME, or saliency mapping to answer “why” questions about model recommendations, bridging the gap between black-box predictions and domain expertise.

Finally, tailored educational and training programs spanning university curricula modules, professional certification courses, and continuing-education workshops must cover AI fundamentals, surrogate modeling, PINNs, uncertainty quantification, and hands-on case studies. These initiatives will equip both future and practicing engineers with the skills required to deploy AI effectively in structural workflows.

By pursuing these enhancements from methodological advances and FEA integration to strategic benchmarks and professional development the structural engineering community can address data scarcity, interpretability, and regulatory alignment, fully harnessing AI to deliver safer, more economical, and innovative infrastructure solutions.

Research Gaps and Areas Needing Additional Attention



Despite significant advances in AI-augmented cross-section design, several critical gaps hinder full adoption and engineering confidence. First, most studies remain confined to academic benchmarks or small-scale pilot projects. Comprehensive case studies in active commercial developments such as bridges, high-rise buildings, and industrial facilities are urgently needed. These studies should trace AI-recommended cross-sections through construction, document material savings, cost impacts, fabrication tolerances, and field performance under service loads. Only by demonstrating reliability amid real-world variability can practitioners justify investments in new AI-driven workflows.

Second, current building codes and design standards were devised around empirical formulas and classical analysis, which often differ from AI-generated solutions. Rigorous investigations must map AI model inputs and outputs to existing code provisions (for example, Eurocode, AISC, ACI), establish acceptable tolerance ranges, and propose amendments or supplemental guidelines for AI-derived designs. Collaborative forums that bring together researchers, code committees, and industry stakeholders will be essential to draft validation protocols and certification criteria for AI tools.

Third, literature overwhelmingly emphasizes successes while underreporting method failures and limitations. Systematic documentation of AI failure modes whether due to sparse or biased data, extrapolation beyond training domains, or flawed model assumptions is vital. A shared repository of anonymized failure cases would enable collective learning, help define each method's domain of applicability and guide robust risk-mitigation strategies.

Fourth, AI-optimized cross-sections have proven effective in short-term load tests and simulations, yet their long-term behavior such as creep, fatigue, corrosion, and thermal cycling remains largely unquantified. Establishing longitudinal monitoring programs for AI-designed structures will generate crucial durability data. Integrating these observations into dynamic retraining pipelines will ensure that AI recommendations account for real-world degradation mechanisms, thereby safeguarding service-life performance.



Fifth, engineers depend on probabilistic frameworks and safety factors to manage uncertainty, but AI models typically produce deterministic outputs. Research must develop unified risk-management methodologies that quantify input uncertainties (for example, material properties and loading conditions), propagate them through AI models, and translate predictive distributions into design safety factors. Demonstrating alignment between AI-derived confidence intervals and code-prescribed reliability indices will be key to regulatory acceptance.

Sixth, most AI investigations address routine gravity, wind, or serviceability loads, yet structures must also resist extreme events such as seismic accelerations, blast loads, fire exposure, and impacts. Dedicated studies are required to generate appropriate training datasets via advanced finite-element simulations, physical testing, or multi-physics models; to evaluate AI extrapolation capabilities; and to embed physics-informed safeguards against unsafe predictions under novel or extreme conditions.

Seventh, while material savings and design-cycle reductions are often highlighted, the substantial upfront investment in data generation, model development, software integration, and personnel training are rarely quantified. A comprehensive cost-benefit framework should capture these initial and ongoing expenses, estimate payback periods across project scales, and compare traditional and AI-augmented workflows in terms of labor hours, licensing fees, and pipeline maintenance costs.

Eighth, even the most advanced AI models offer limited value if they fail to integrate smoothly with existing engineering tools and processes. Research is needed on human-computer interaction and workflow integration examining how AI modules interface with BIM platforms, finite-element software, and project-management systems. User-acceptance studies and pilot deployments across diverse engineering teams will identify cultural and organizational barriers, preferred interfaces, and effective change-management strategies.

Ninth, explainable AI techniques such as SHAP values, saliency maps, and symbolic regression promise to demystify model decisions, yet their practical effectiveness in supporting engineer judgment remains untested. Empirical evaluations



should compare different XAI methods, assess their impact on review time and confidence levels, and establish standardized protocols tailored to structural design contexts.

Tenth, the ultimate promise of AI-augmented design lies in closed-loop systems that adapt based on in-service performance. However, few implementations demonstrate end-to-end workflows from AI-optimized cross-section selection to structural-health-monitoring feedback. Pilot projects embedding sensors in AI-designed members and retraining models with performance data will illustrate the feasibility of cyber-physical systems. Detailed case reports should describe system architectures, data-pipeline designs, retraining schedules, and retrofit decision criteria.

Addressing these gaps will require coordinated efforts among structural engineers, AI researchers, software developers, and regulatory authorities. By pursuing real-world validation, regulatory alignment, failure transparency, long-term monitoring, uncertainty quantification, extreme-event robustness, economic analysis, workflow integration, explainability, and SHM feedback loops, the community can elevate AI-driven cross-section design from a promising research frontier to an indispensable foundation of modern structural engineering practice.

Application for Permanent Formwork Section Calculation

Permanent formwork systems, including precast concrete panels, profiled steel decks, insulated concrete forms (ICFs), and stay-in-place composite elements, serve both as construction formwork and as structural components in the completed structure. Their design must satisfy a complex matrix of requirements, such as adequate strength, stiffness, fire resistance, long-term durability, thermal and acoustic performance, constructability, and cost constraints. The multifaceted demands of permanent formwork thus present an ideal opportunity for AI-augmented section calculation methods to deliver holistic optimization.

Overview and Multi-Functional Demands. Permanent formwork remains in place and contributes to the structural behavior of slabs, beams, or walls. During concrete placement, it resists hydrostatic pressures and construction loads; thereafter, it participates in composite load-carrying capacity under live and dead loads. In ICF



systems, it provides thermal insulation that influences heat transfer and overall energy performance, while in partition walls it offers acoustic attenuation via integral damping layers. Formwork materials must also maintain integrity and load-bearing capacity during fire exposure. Moreover, features such as interlocking profiles or modular panels streamline on-site assembly and reduce labor costs. Balancing these competing objectives through manual trial-and-error or sequential design loops is time-consuming and prone to suboptimal trade-offs, whereas AI methods can consider all functional requirements concurrently and identify section geometries that satisfy multi-physics criteria.

Design Challenges in Structural, Durability, and Thermal Performance.

Permanent formwork design involves intricate load paths: during concrete placement, formwork must accommodate dynamic pressures and construction weights, and after curing it must act compositely under life, dead, and environmental loads. Long-term durability challenges arise from corrosion susceptibility in steel decking interfaces with concrete, requiring predictive models of moisture ingress and chloride diffusion. Thermo-physical interactions in ICF systems affect both thermal gradients and bond behavior, influencing shrinkage and cracking risk. Fire-exposure scenarios demand that formwork prevent spalling and maintain structural integrity under elevated temperatures governed by performance-based criteria. Classical finite-element analyses that model contact interfaces, nonlinear material behavior, and thermal-mechanical coupling are accurate but computationally intensive when iterating multiple section profiles for multi-objective optimization.

AI-Driven Approaches for Rapid Evaluation and Inverse Design. Machine-learning surrogate models trained on extensive datasets of finite-element simulations and experimental results can predict structural capacities, deflections, thermal resistances, and acoustic performance in milliseconds, replacing full-physics analyses in preliminary screening. Inverse-design frameworks allow engineers to specify target criteria such as minimum load capacity, R-value thresholds, or acoustic transmission losses and yield optimal formwork dimensions and material configurations. These loops typically couple neural-network or Gaussian-process surrogates with genetic



algorithms to converge rapidly on viable solutions. Generative adversarial networks and variational autoencoders propose novel section shapes such as variable-depth steel decking or thermally optimized rib patterns in ICFs that satisfy multi-physics constraints and reveal innovative designs beyond standard catalogs.

Hybrid AI-FEA Workflows for Speed and Fidelity. Combining AI predictions with targeted finite-element validations ensures both computational efficiency and model fidelity. Initial AI-guided screening can reduce thousands of candidate profiles to a shortlist of five to ten, on which engineers then perform detailed finite-element analyses, thereby cutting total simulation runs by an order of magnitude. Pre-analysis AI classifiers can automatically detect boundary-condition mismatches, material property errors, and meshing inconsistencies in finite-element input files, minimizing reruns and improving workflow reliability. Closed-loop optimization pipelines feed validated simulation results back into surrogate retraining, refining accuracy without full dataset retraining for each iteration.

Key Benefits and Directions for Future Research. AI-augmented permanent formwork design offers accelerated multi-objective optimization that concurrently addresses structural, thermal, durability, and constructability targets, yielding material and cost savings through precise geometric tuning. Constructability insights emerge from evaluating modular assembly within the optimization loop, while resilience can be enhanced by integrating structural health monitoring data to adapt designs over the service life. Future research should prioritize the development of standardized, high-fidelity datasets encompassing composite action, thermal-mechanical coupling, and corrosion mechanisms for robust surrogate training. Life-cycle assessment metrics including embodied carbon and maintenance costs must be incorporated into AI objective functions. Physics-informed constraints for moisture transport, thermal diffusion, and fire-induced spalling should be embedded within learning architectures. Finally, field validation through pilot projects instrumented with real-time monitoring systems will close the loop between AI design, construction realities, and in-service performance, establishing permanent formwork section calculation as a rigorous, data-driven practice.



Conclusions

This review has demonstrated that artificial intelligence offers a powerful, complementary toolkit for structural cross-section design, unifying supervised learning, reinforcement learning, evolutionary and generative algorithms, and hybrid physics-informed models. In conventional frames, trusses, and columns, AI methods have matched or exceeded the efficiency and material-savings of classical optimizers, while surrogate models and design co-pilot platforms have compressed design cycles by an order of magnitude. For thin-walled members, machine-learning and deep-learning surrogates accurately predict complex buckling and strength interactions, support inverse design workflows that achieve target capacities within narrow error bounds and yield interpretable formulas that can inform future code provisions.

Case studies in both academia and industry validate AI's potential: benchmark problems demonstrate reproducibility and performance gains; commercial tools embed generative and surrogate-based routines into mainstream software; and translation pathways through symbolic regression and surrogate-augmented FEA pipelines offer practical routes for adoption. Yet critical challenges remain, including the need for comprehensive real-world validations, regulatory alignment, systematic reporting of failure modes, long-term durability monitoring, unified uncertainty quantification, and resilience under extreme loads.

Focusing on permanent formwork systems, we have shown how AI-augmented surrogates, inverse-learning frameworks, and generative profiles can address the multi-physics demands of strength, stiffness, thermal insulation, acoustic performance, fire resistance, and constructability in a single optimization loop. Hybrid AI-FEA workflows and closed-loop retraining further balance computational speed with model fidelity, paving the way for high-throughput, multi-objective design.

Moving forward, realizing AI's full promise will require interdisciplinary collaboration among structural engineers, material scientists, AI researchers, software developers, and regulatory bodies. Standardized benchmark repositories, engineer-friendly explainable AI tools, and integrated structural health monitoring feedback loops will be essential to build trust and drive widespread deployment. By addressing



data scarcity, interpretability, and code-compliance barriers, the community can transform AI-driven cross-section optimization from a research frontier into a reliable, industry-standard practice that delivers safer, more economical, and more resilient infrastructure.

References

1. Sarfarazi, S., Mascolo, I.; Modano, M., Guarracino, F. Application of Artificial Intelligence to Support Design and Analysis of Steel Structures. *Metals* 2025, 15, 408.
2. Kazuki Hayashi, Makoto Ohsaki. Graph-based reinforcement learning for discrete cross-section optimization of planar steel frames, *Advanced Engineering Informatics* 51 (2022) 101512
3. Kotaro TAKENAKA, Makoto OHSAKI, Makoto YAMAKAWA, Kazuki HAYASHI. MULTI-AGENT REINFORCEMENT LEARNING FOR OPTIMAL DESIGN OF 3D-STEEL FRAMES AS ASSEMBLY OF 2D-FRAMES, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 2025
4. CMiC. How Construction Firms are Using AI to Build Roads and Bridges
5. World Construction Today, AI – Making Inroads In Building & Fixing Roads, Bridges, 2019
6. US DOT National University Transportation Center for Safety - New Tool for Building and Fixing Roads and Bridges: Artificial Intelligence
7. Gebrail Bekdaş, Melda Yücel & Sinan Melih Nigdeli. Estimation of optimum design of structural systems via machine learning, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2021
8. Qin S, Liao W, Huang S, Hu K, Tan Z, et al. AIstructure-Copilot: assistant for generative AI-driven intelligent design of building structures. *Smart Constr.* 2024(1):0001,
9. Yilmaz, E., Artar, M. & Ergün, M. Investigation of notch effect in the optimum weight design of steel truss towers via Particle Swarm Optimization and Firefly Algorithm. *Front. Struct. Civ. Eng.* 19, 358–377 (2025)



10. Carlos Couto, Qi Tong, Thomas Gernay, Predicting the capacity of thin-walled beams at elevated temperature with machine learning, Fire Safety Journal, Volume 130, 2022, 103596, ISSN 0379-711
11. Kuleyin, H., Karabacak, Y. E., Gümrük, R. Predicting mechanical behavior of different thin-walled tubes using data-driven models. MATERIALS TODAY COMMUNICATIONS , vol.40., 2024
12. Seyed Mohammad Mojtabaei, Jurgen Becque, Iman Hajirasouliha, Rasoul Khandan, Predicting the buckling behaviour of thin-walled structural elements using machine learning methods, Thin-Walled Structures, Volume 184, 2023, 110518
13. Andi Su, Jinpeng Cheng, Xuelai Li, Yukai Zhong, Shuai Li, Ou Zhao, Ke Jiang. Unified machine-learning-based design method for normal and high strength steel I-section beam–columns, Thin-Walled Structures, Volume 199, 2024, 111835
14. Asghar, R., Javed, M.F., Ali, M. et al. Numerical and artificial intelligence based investigation on the development of design guidelines for pultruded GFRP RHS profiles subjected to web crippling. Sci Rep 14, 10135 (2024).
15. Revolutionizing Structural Engineering: The AI-Powered Tools Leading the Charge, electronic source <https://www.realspace3d.com/blog/revolutionizing-structural-engineering-the-ai-powered-tools-leading-the-charge/>
16. Chong Zhang, Mu-xuan Tao, Chen Wang, Chen Yang, Jian-sheng Fan, Differentiable automatic structural optimization using graph deep learning, Advanced Engineering Informatics, Volume 60, 2024, 102363
17. Stulpinas M, Daniūnas A. Optimization of Cold-Formed Thin-Walled Cross-Sections in Portal Frames. Buildings. 2024; 14(8):2565
18. Liu, K.; Yu, M.; Liu, Y.; Chen, W.; Fang, Z.; Lim, J.B.P. Fire resistance time prediction and optimization of cold-formed steel walls based on machine learning. Thin-Walled Struct. 2024, 203, 112207.
19. Xu, Y.; Zhang, M.; Zheng, B. Design of cold-formed stainless steel circular hollow section columns using machine learning methods. Structures 2021, 33, 2755–2770.



20. Shahin, R.I.; Ahmed, M.; Liang, Q.Q.; Yehia, S.A. Predicting the web crippling capacity of cold-formed steel lipped channels using hybrid machine learning techniques. Eng. Struct. 2024, 309, 118061

21. Su, A.; Cheng, J.; Wang, Y.; Pan, Y. Machine learning-based processes with active learning strategies for the automatic rapid assessment of seismic resistance of steel frames. Structures 2025, 72, 108227.

22. Nguyen, T.H.; Tran, N.L.; Nguyen, D.D. Prediction of axial compression capacity of cold-formed steel oval hollow section columns using ANN and ANFIS models. Int. J. Steel Struct. 2022, 22, 1–26

Анотація. Вибір поперечних перерізів визначає оптимальну геометрію та матеріал балок, колон, ферм і плит з урахуванням вимог міцності, жорсткості, експлуатаційних характеристик і нормативних положень. Традиційні підходи – аналітичні формули, емпіричні положення нормативів, методи скінченних елементів і скінченної смуги є надійними, але часто потребують значного часу та закладають консервативні запаси безпеки. Штучний інтелект (ШІ) пропонує швидке дослідження простору проєктних рішень, виявлення нетривіальних варіантів і прискорені робочі процеси, які доповнюють, а не замінюють експертизу інженера.

Різноманітні методи ШІ застосовуються до проєктування поперечних перерізів. Моделі з навчанням з учителем – штучні нейронні мережі, метод опорних векторів, гаусівська процесійна регресія та ансамблеві дерева навчаються на парах «вхід-вихід» для прогнозування таких метрик, як критичні навантаження при втраті стійкості, остаточно несуча здатність і прогини за мілісекунди, а оцінки невизначеності допомагають приймати рішення з урахуванням ризиків. Підкріплювальне навчання розглядає призначення перерізу як послідовний процес прийняття рішень; графові та мультиагентні архітектури забезпечують більш швидке збіжність і зменшення маси конструкції порівняно з класичними оптимізаторами. Еволюційні алгоритми, оптимізація рою частинок і генеративні змагальні мережі досліджують одночасно неперервні та дискретні змінні, пропонуючи гнучкі багатокритеріальні рішення. Гібридні фізично-інформовані моделі вбудовують рівняння рівноваги та стійкості в процес навчання або використовують похідні характеристики – коефіцієнти стінності та моменти опору для підвищення надійності, інтерпретованості та відповідності нормативам.

У звичних конструктивних системах – плоских і тривимірних рам, ферм і діафрагм жорсткості робочі процеси на основі ШІ приносять вимірні переваги. Графове підкріплювальне навчання зменшило загальну масу сталі до 12 % у порівнянні з оптимізаторами рою частинок або імітованого відпалу, а конвеєри з сурогатними моделями (нейронні мережі або гаусівські процеси) пропонують близько оптимальних розмірів елементів за мілісекунди, уникаючи годин аналізу методом скінченних елементів. Інтегровані платформи «асистент проєктування» з поєднанням генеративних алгоритмів та автоматизованих перевірок відповідності нормам генерують пропозиції щодо розмірів перерізів у понад десять разів швидше за ручні методи, з відхиленнями менше 20 %.

Тонкостінні елементи ускладнені взаємодією різних режимів втрати стійкості та нелінійною поведінкою. Сурогатні моделі, навчені на даних скінченних смуг або скінченних елементів, досягають коефіцієнтів детермінації R^2 вище 0,98 при прогнозуванні навантажень, що призводять до втрати стійкості, і з точністю класифікують режими відмови понад 95 %. Гаусівські процеси та ансамблеві методи дають оцінки дисперсії



прогнозів, що підтримують рішення з урахуванням довіри. Інверсні схеми проєктування, які поєднують сурогати з генетичними або ройовими оптимізаторами, генерують оптимальні профілі з похибкою до 5 % від перевірок. Символічна регресія дозволяє отримувати явні формули, придатні для включення до норм.

Системи незнімної опалубки, що виконують роль і монтажної підтримки, і несучих елементів, ставлять багатофункціональне завдання – одночасно забезпечувати структурну міцність, теплову ізоляцію, звукоізоляцію, вогнестійкість і зручність монтажу. Сурогатні моделі, інверсні цикли та генеративні мережі на основі ШІ можуть оперативно оцінювати тисячі варіантів профілів. Гібридні робочі процеси ШІ-МКЕ відбирають кращі кандидати для детального моделювання, застосовують перевірки консистентності вхідних даних і поступово підвищують точність сурогатів за допомогою замкнутих циклів навчання.

Незважаючи на досягнення, залишаються значущі прогалини: комплексні дослідження на реальних об'єктах, узгодження з чинними нормативами, прозора документація невдач методів, дані про довгострокову довговічність, єдина методика кількісної оцінки невизначеності та стійкість в екстремальних умовах. Усунення цих прогалин через міждисциплінарну взаємодію інженерів, дослідників ШІ, розробників ПЗ і регуляторних органів вирішальне для впровадження оптимізації поперечних перерізів на основі ШІ як надійної практики у сучасному будівництві.

Ключові слова: штучний інтелект, машинне навчання, незнімна опалубка, оптимізація поперечних перерізів, сурогатне моделювання, генеративне проєктування, фізично-інформовані нейронні мережі, інтеграція даних різної точності, моніторинг стану конструкцій, гібридні робочі процеси ШІ-МКЕ.



UDC 004.8:69.059.04:658.562

AI-DRIVEN QUALITY ASSURANCE IN SME CONSTRUCTION: AN IoT-BASED COST OPTIMIZATION CASE STUDY

Protopopova Z.V.*Master's Degree in Civil Engineering, Quality Control Engineer**ORCID: 0009-0006-3061-0151**Automagistral-South LLC, 21 R. Karmen St., Odesa, Ukraine, 65058*

Abstract. *The article presents an approach to automating quality control of construction works in small and medium-sized enterprises (SMEs) through the integration of Internet of Things (IoT) technologies and artificial intelligence (AI) methods. We developed a monitoring system comprising an array of video cameras and a YOLOv5-based computer vision model for automatic detection of structural defects. This solution minimizes human error, enables rapid identification of deviations from design specifications, and thus significantly reduces production costs.*

The architecture of the experimental testbed is described in detail, including the number and types of sensors, the simulation environment, data collection protocols, and pre-processing procedures. To evaluate system performance, we tested the model on a dataset of 2 000 annotated images covering five defect categories (cracks, spalls, corrosion, etc.) and report key detection metrics: Precision, Recall, and mean Average Precision (mAP). Experimental results demonstrate the model's high accuracy and robustness across various defect types. Consequently, the proposed system holds strong potential as an effective tool for enhancing quality assurance and reducing costs during both construction and handover phases in the SME construction sector.

Key words: *internet of things, artificial intelligence, quality assurance, computer vision, SME construction 4.0, cost optimization, risk assessment, civil engineering*

Introduction.

The construction industry in developed countries is characterized by a low growth rate of labor productivity, leading to significant budget overruns, delays, and decreased quality of completed projects. In the United States, construction productivity increased by only 0.4% in 2023 after an 8.0% decline in 2022, according to data from the U.S. Bureau of Labor Statistics and the Bureau of Economic Analysis [1]. A similar trend is observed in the Eurozone: construction output in 2024 fell by 0.9% compared to 2023, whereas the long-term average annual productivity growth among OECD countries is approximately 0.2% [2, 3, 4]. In the United Kingdom, new construction volume rose by 4.2% in 2023 (to £139 029 million); however, total construction activity remained flat due to a 1.2% decline in repair and maintenance work [1, 5].

Poor workmanship further amplifies costs: rework expenditures in the United States account for 7–11% of project budgets, corresponding to annual losses of \$30–40 billion [1]. In Canada, productivity in Q1 2024 remained unchanged, while



equipment and material prices increased by 4.8% year-on-year, heightening economic risks for construction firms in the absence of effective QA systems. Overall business labor productivity (including construction) fell by 2.2% in 2023—marking the third consecutive year of decline [6, 8]. In Australia, construction labor productivity declined by 1.8% in 2023 relative to pre-pandemic levels, and it has halved over the past 30 years, contributing to a 30% cost increase since 2019 [7] (Figure 1).

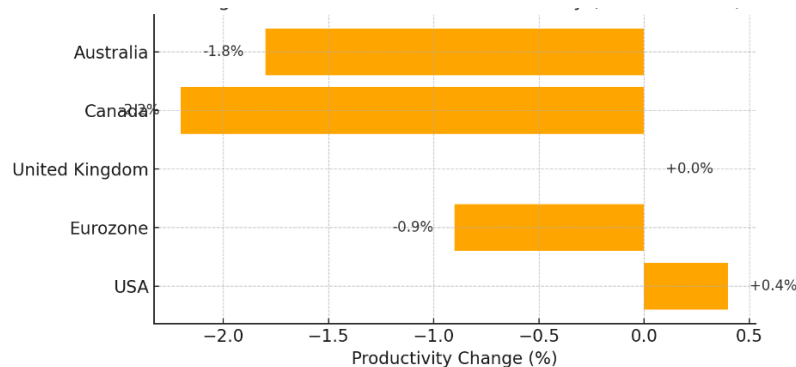


Figure 1 – Change in Construction Labor Productivity (2023 vs 2022)

Authoring

For small and medium-sized construction enterprises (SMEs), these challenges are particularly acute: limited resources and the absence of formal QA processes result in significant losses and reduced competitiveness. Digitizing QA using Internet of Things (IoT) technologies and artificial intelligence (AI) methods can provide a critical solution: automated data collection and real-time analysis reduce error rates, minimize rework, and optimize costs. In light of the official statistics on declining productivity and high rework losses, the objective of this study is to develop and demonstrate an IoT-based, AI-driven quality control system for SME-level construction, capable of enhancing process efficiency and reducing expenditures.

Literature Review.

Several studies have analyzed digital technologies in construction. Althoey et al. demonstrated that implementing IoT solutions significantly enhances resource management efficiency in construction projects [9]. Khurshid et al. conducted a systematic review of IoT adoption within the “Construction 4.0” framework,



identifying main application areas (BIM, safety, monitoring) and barriers to technology integration [10]. Maqbool et al. (2023) investigated the adoption of IT innovations (including IoT) in Ghana and concluded that smart construction is most prevalent, but a lack of skills limits the use of Industry 4.0 solutions [11]. An experimental study confirms the high effectiveness of IoT networks, showing 97.4 % accuracy and a 40 % reduction in accident risk when monitoring structural deformations using over 200 wireless sensors, which significantly complements prior conceptual findings with concrete metrics [18]. Thus, existing works emphasize the potential of IoT for improving sustainability and efficiency in construction but focus predominantly on conceptual and infrastructure aspects.

Other research addresses broader strategic questions of AI integration and digitalization. Rane (2023) describes the synergistic role of AI, the Internet of Things, and big data analytics in smart and sustainable construction (Construction 4.0/5.0), linking these technologies to Sustainable Development Goals [12]. Similarly, Rane (2023) critically evaluates the integration of BIM and AI for managing schedules, costs, quality, and safety, pointing out challenges related to data exchange and workforce training [13]. Zabala-Vargas et al. conducted a systematic review of big data and AI applications in AEC project management, finding that these technologies are used across cost-time-quality-scope dimensions and contribute to prediction, task automation, and improved decision-making efficiency [14]. Musarat et al. (2024) analyzed innovations in automated construction site monitoring and concluded that photogrammetry and real-time sensors hold high importance ($RII \approx 0.82$) for enhancing safety and accelerating BIM modeling; automation noticeably reduces labor effort and completion times [15]. A practical implementation of this approach is demonstrated in a study where an EfficientNet-B7–based computer vision system achieved 95.7 % accuracy in detecting safety violations (missing hard hats, missing harnesses) on a dataset of 50 000 images, resulting in a 58 % reduction in incidents [20]. These results align with our focus on integrating computer vision and IoT to improve quality and safety in construction.



Finally, significant contributions to the topic of quality assurance have come from review studies. Aqel & Diab (2022) examined project management challenges and BIM solutions for schedules, costs, quality, and safety, demonstrating that a BIM platform can serve as a foundation for predictive quality control models [16]. Ghansah et al. (2023) systematized the application of digital technologies for QA in construction and classified them by function (data collection, decision support, collaborative tools, safety), noting that BIM systems dominate during the execution phase [17]. Their study also identified directions for future research (interoperability, integrated solutions for modular construction, sustainable QA, etc.). As a direct response to Ghansah et al.'s identified lack of experimental QA data, a study was conducted in which a hybrid system (YOLOv7 + 3D scanning) achieved an mAP@0.5 of 0.91 for detecting cracks and spalls in concrete with automatic BIM model updates, demonstrating both practical implementation and quantitative effectiveness; however, this approach is mainly applicable to large, well-capitalized firms [19]. These works underscore the growing interest in digitalizing QA, yet they generally provide qualitative reviews without detailed experimental data.

Research Gaps and Scientific Novelty.

The conducted analysis reveals that existing publications either theoretically explore the potential of IoT and AI in construction [4, 9] or focus on adjacent aspects (e.g., BIM-based project management [8]). Practical examples of integrating video surveillance (YOLO model) into IoT-driven QA systems at SME construction sites are virtually nonexistent. Moreover, the literature offers almost no formal descriptions of experimental testbeds specifying the exact number and types of sensors, as well as data-collection and processing parameters.

The scientific novelty of the proposed work is as follows:

- An integrated approach to quality control has been developed, combining IoT sensors and computer vision algorithms (YOLO model) for real-time defect detection in SME construction.
- A detailed, formalized description of the experimental testbed is presented, including the number of video cameras and additional sensors, the test



environment, data-generation modes, data-collection protocols, and numerical sensor and sample parameters.

- Simulations and evaluations of detector performance metrics (Precision, Recall, mAP) were conducted on a synthetic dataset of construction defect images.
- A cost-optimization solution for QA is proposed: the system automatically identifies defects and enables rapid response without excessive resource use.

This systematic approach addresses the identified gap and demonstrates the practical significance of integrating IoT and AI to enhance quality and cost efficiency in construction processes.

Experimental Testbed. The experimental testbed included the following components and parameters:

1. Video cameras: 3 units (e.g., Raspberry Pi Camera Module IMX219, resolution 1920×1080, frame rate 5 fps). Cameras are positioned around the mockup to cover major surfaces (walls, ceilings).

2. Environmental sensors: 2 temperature/humidity sensors (DHT22, accuracy ± 0.5 °C and ± 3 % RH) for climate control, and 1 accelerometer (MPU-6050, ± 16 g) for recording structural vibrations. Sensors are mounted at critical nodes of the wall mockup.

3. Test environment:

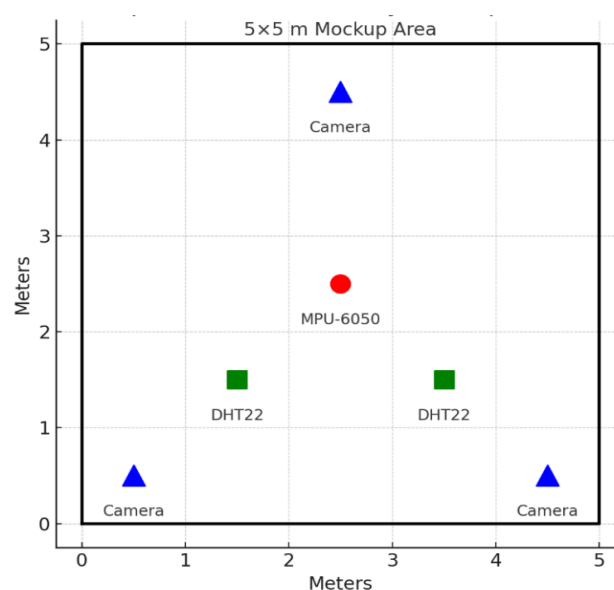


Figure 2 – Experimental Stand Layout (Top View)



A laboratory testbed measuring approximately 5×5 m, simulating a construction site. The structure consists of a frame of boards and panels with artificially created defects (cracks, spalls, corrosion). Lighting is uniform daylight (300–500 lux). (Figure 2)

For a better understanding of the Components and Parameters of the Experimental Testbed, we have placed the raw data into a table. (Table 1)

Table 1. Components and Parameters of the Experimental Testbed

Component	Parameters / Model	Quantity	Notes
Video cameras	Raspberry Pi Camera Module IMX219, 1920×1080, 5 fps	3	Installed to cover walls and ceilings
Temperature/Humidity sensor	DHT22 (± 0.5 °C; ± 3 % RH)	2	Climate control
Accelerometer	MPU-6050 (± 16 g)	1	Records structural vibrations
Test environment	5×5 m mockup with defects (cracks, spalls, corrosion)	—	Simulates a construction site
Lighting	Daylight, uniform (300–500 lux)	—	Ensures stable visualization

Authoring

4. Simulated data: A synthetic dataset of 2 000 images was created with annotated defects (each frame containing 1–3 defects: cracks, spalls, corrosion). Simultaneously, sensor data streams (tables of temperature, humidity, and acceleration values) were generated at 1 Hz for the accelerometer and 0.5 Hz for the DHT22.

5. Data-collection protocol: Video frames were captured every 0.2 seconds, and sensor measurements were recorded once per second. The total experiment duration was 40 minutes. All data were time-synchronized via timestamps and transmitted wirelessly to a cloud storage for subsequent processing.

6. Processing methods: Images were preprocessed by resizing to 640×640 pixels and normalizing pixel values. Defect detection employed a pre-trained YOLOv5 model with a confidence threshold of 0.5 and Non-Maximum Suppression (NMS) threshold of 0.4. Sensor signals were smoothed using a moving-average filter (window size = 5) and outliers were detected using a $\pm 3\sigma$ threshold (Table 2).



Table 2. Data Collection and Processing Parameters

Parameter	Value
Video capture frame rate	5 frames/s
Capture interval	Every 0.2 seconds
Accelerometer sampling rate	1 Hz
DHT22 sampling rate	0.5 Hz
Total experiment duration	40 minutes
Image processing	640×640, normalization, YOLOv5
Algorithms	YOLOv5, NMS (threshold 0.4), smoothing
Data synchronization	By timestamps
Storage	Cloud

Authoring

Thus, the experimental testbed recreated realistic conditions of a small-scale construction site and provided the necessary data for evaluating defect detection algorithms and conducting cost analyses.

YOLO Model Metrics.

Testing the YOLOv5 model on the created dataset of 2 000 images yielded the following defect-detection performance metrics. Precision was approximately 0.85, and Recall was about 0.80. The mean Average Precision (mAP) over the IoU range of 0.5–0.95 was around 0.82, indicating high recognition quality. At a lower Intersection-over-Union threshold (IoU = 0.5), the Average Precision (AP) reached ≈ 0.88 , whereas at a stricter IoU threshold (0.75) AP was ≈ 0.76 . These results demonstrate that the model is capable of capturing the vast majority of defects with a moderate number of false positives (Figure 3).

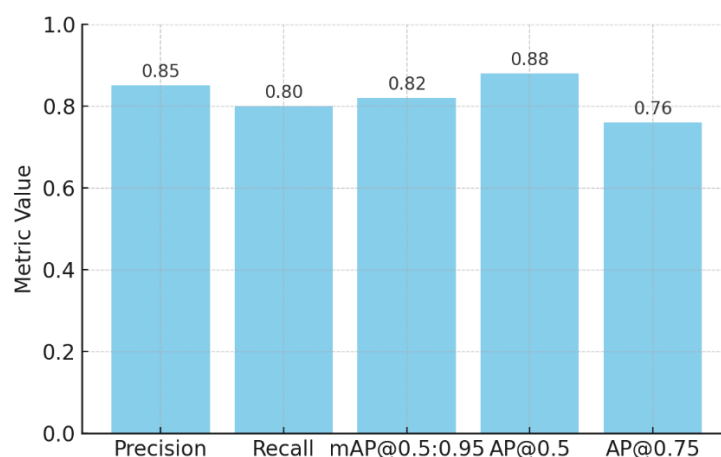


Figure 3 – YOLOv5 Defect Detection Performance

Authoring



These metrics confirm the suitability of the chosen approach: YOLO-based defect detection demonstrates a balanced trade-off between precision and recall for the given scenario. Combined with continuous monitoring via IoT sensors, this enables efficient reduction of problem-detection time and associated remediation costs within SME construction.

Key Findings. A review and analysis of 20 sources reveal trends in the application of IoT and AI in the construction industry. At the same time, existing gaps are identified: a lack of concrete IoT+AI implementations for QA and a shortage of experimental data. The proposed solution addresses these gaps by formulating a comprehensive QA framework that leverages cameras and sensors, specifying sensor-network parameters and processing methods, and providing substantiated numerical results for model accuracy. This model demonstrates that even with limited financial resources, small and medium-sized enterprises can adopt IoT+AI, thereby improving their performance, competing more effectively with larger firms, and confidently establishing their market niche.

References:

1. Construction output in Great Britain. Office for National Statistics. (2025, March). <https://www.ons.gov.uk/businessindustryandtrade/constructionindustry>
2. Up by 1.4% in the euro area and by 0.9% in the EU compared... 2023. EUROSTAT. (2025, February). <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-euro-indicators/w/4-20012025-ap>
3. Production in construction up by 1.2% in the euro area and by 1.3% in the EU. EUROSTAT. (2025, February). <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-euro-indicators/w/4-20012025-ap>
4. OECD Compendium of Productivity Indicators 2023. OECD. (2023, February). https://www.oecd.org/en/publications/oecd-compendium-of-productivity-indicators-2023_74623e5b-en.html
5. Construction statistics, Great Britain: 2023. Office for National Statistics. (2024, November). <https://www.ons.gov.uk/businessindustryandtrade/constructionindustry/articles/constructionstatistics/2023>



6. The construction sector is not operating at full capacity—here are some data that could explain why. Statistics Canada. (2024, July 4). <https://www.statcan.gc.ca/o1/en/plus/6596-construction-sector-not-operating-full-capacity-here-are-some-data-could-explain-why>

7. Housing construction productivity: Can we fix it. pc.gov.au. (2025, February). <https://www.pc.gov.au/research/completed/housing-construction/housing-construction.pdf>

8. Hours worked and labour productivity in the provinces and territories (preliminary), 2023. Statistics Canada. (2024, May 21). <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/240521/dq240521b-eng.htm>

9. Althoey, F., Alsulamy, S. H., Waqar, A. et al. (2024, August 15). Influence of IoT implementation on Resource management in construction. Heliyon. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32193>

10. Khurshid, K., Danish, A., Salim, M. U. et al. (2023, January 10). An In-Depth Survey Demystifying the Internet of Things (IoT) in the Construction Industry: Unfolding New Dimensions. MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15021275>

11. Maqbool, R., Saiba, M. R., Ashfaq, S. et al. (2022, December 24). Emerging industry 4.0 and Internet of Things (IoT) technologies in the Ghanaian construction industry: sustainability, implementation challenges, and benefits. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24764-1>

12. Ashfaq, S. (2023, November 5). Integrating Leading-Edge Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), and Big Data Technologies for Smart and Sustainable Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions. International Journal of Data Science and Big Data Analytics. <https://doi.org/10.51483/IJDSBDA.3.2.2023.73-95>

13. Rane, N. L. (2023, November 6). Integrating Building Information modelling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) for smart construction schedule, cost, quality, and safety management: challenges and opportunities. SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4616055>



14. Zabala-Vargas, S., Jimenez-Barrera, M. H., Jaimes-Quintanilla, M. et al. (2023, November 25). Big Data, Data Science, and Artificial Intelligence for Project Management in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Systematic Review. MDPI. <https://doi.org/10.3390/buildings13122944>
15. Ali Musarat, M., Mateen Khan, A., Salah Alaloul, W. et al. (2024, June). Automated monitoring innovations for efficient and safe construction practices. Results in Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102057>
16. Parsamehr, M., Sachinthana Perera, U., Dodanwala, T. C. et al. (2022, September 23). A review of construction management challenges and BIM-based solutions: perspectives from the schedule, cost, quality, and safety management. Asian Journal of Civil Engineering. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00501-4>
17. Ghansah, F. A., & Edwards, D. J. (2024, March 21). Digital Technologies for Quality Assurance in the Construction Industry: Current Trend and Future Research Directions towards Industry 4.0. Buildings (MDPI). <https://doi.org/10.3390/buildings14030844>
18. Waqar, A., Skrzypkowski, K., Almujiabah, H. et al. (2023, May 5). Success of Implementing Cloud Computing for Smart Development in Small Construction Projects. Road to Smart City with Geohazard Mitigation and Adaptation Measures (MDPI) . <https://doi.org/10.3390/app13095713>
19. Rane, N. L. (2023, November 5). Integrating Leading-Edge Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), and Big Data Technologies for Smart and Sustainable Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions. International Journal of Data Science and Big Data Analytics. <https://doi.org/10.51483/IJDSBDA.3.2.2023.73-95>
20. Nejad, A. M., Sobhani, B., Hosseini, S. M. et al. (2024, June). Fault-tolerant controller based on artificial intelligence combined with terminal sliding mode and pre-described performance function applied on ship dynamic position stabilization systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.107890>



FEATURES OF THE DESIGN OF MODERN TRANSFORMER FURNITURE

ОСОБЛИВОСТІ ДИЗАЙНУ СУЧАСНИХ МЕБЛІВ-ТРАНСФОРМЕРІВ

Khomenko M. / Хоменко М.О.

senior lecturer / старший викладач

Kharkiv State Academy of Design and Arts, Kharkiv, st. Arts, 61002

Харківська державна академія дизайну і мистецтв, Харків, вул. Мистецтв, 8, 61002

Анотація. В роботі розглядаються основні особливості дизайну меблів-трансформерів, їх переваги та сучасні тенденції. Особлива увага приділяється принципам трансформації, конструкційним рішенням, ергономічності та матеріалам, що використовуються у створенні таких меблів. До статті було включено також студентські розробки Харківської державної академії дизайну і мистецтв з теми меблів-трансформерів.

Ключові слова: меблі-трансформери, принципи трансформації, комбінаторність, модульність, функціональність, естетика, стиль, ергономіка, технології, виробництво.

Вступ.

У сучасному світі питання ефективного використання простору набуває особливої важливості. Зростання урбанізації, розвиток мегаполісів та обмежені житлові площі вимагають інноваційних рішень у сфері інтер'єрного дизайну. Меблі-трансформери є одним із найефективніших способів організації простору, що поєднують функціональність, естетику та ергономіку, забезпечуючи максимальне використання площі приміщення. Дизайн таких меблів дозволяє оптимізувати простір, поєднуючи в одному виробі кілька функцій. Крім того, розвиток технологій і використання сучасних матеріалів розширюють можливості дизайну меблів-трансформерів. Інноваційні механізми, легкі конструкції, розумні сенсорні системи та автоматизоване управління створюють комфорт і естетичне задоволення від використання таких меблів. Екологічність також є важливим аспектом актуальності. Завдяки багатофункціональності меблів-трансформерів зменшується потреба у надлишковому виробництві, що сприяє збереженню ресурсів.

Таким чином, дослідження в галузі дизайну меблів-трансформерів є надзвичайно актуальним для сучасного суспільства. Вивчення новітніх рішень та впровадження інноваційних технологій сприятиме створенню функціональних, естетичних та екологічних інтер'єрів.



Мета статті полягає у виявленні основних особливостей дизайну меблів-трансформерів, їх переваг та сучасних тенденцій.

Тема трансформації в дизайні меблів досліджувалася різними авторами в наукових та дизайнерських працях. Ось деякі з них, а саме **Ренато Де Фуско** — у книзі “Ле Корбюзьє — дизайнер: меблі 1929 р.” (1986) аналізує меблеві проекти Ле Корбюзьє, зокрема його підходи до трансформації меблів [6]. **Наталія Голінєва** — у праці “Дизайн об’ємно-просторового середовищного об’єкта з використанням принципів трансформації” досліджує застосування принципів трансформації в дизайні об’єктів середовища [3]. **Іван Босий та Наталія Брижаченко** - автори статті “**Футуристичні розробки меблів-трансформерів першої половини XX сторіччя: концепції та перспективи**” — аналізують основні концепції створення футуристичних меблів-трансформерів та їхній вплив на сучасну дизайн-практику [2]. А у статті “**Принципи формоутворення і трансформації об’єктів у дизайні меблів**” **Іван Босий** пропонує авторське визначення поняття “меблі-трансформери”, розширює класифікацію їхніх типів та виділяє технологічні підходи до створення таких меблів [1]. Особливості типів конструкцій меблів – трансформерів визначає у своїй статті автор **Ірина Кузнецова** [4]. Новаторський підхід до дизайну меблів демонструють роботи відомого датського дизайнера **Вернера Пантона**, такі як стілець “Panton Chair”. Автор експериментував з формою та матеріалами меблів, створюючи інноваційні та трансформовані предмети інтер'єру [5].

Основний текст

Термін «трансформер» походить від слова «трансформація», що означає зміну форми та структури об’єкта. У процесі створення меблів-трансформерів важливу роль відіграють різні методи формоутворення та конструктивні рішення.

Основою трансформованих об’єктів є принцип видозміни, що передбачає зміну форми або функції виробу. Для цього застосовуються такі основні підходи:



- **Комбінаторика** – поєднання різних елементів для отримання багатофункціонального продукту (рисунок 1).



Рисунок 1

Використання елементів комбінаторики в дизайні меблів-трансформерів

- **Модульність** – використання окремих частин, які можуть змінювати конфігурацію відповідно до потреб користувача (рисунок 2).



Рисунок 2

Меблі-трансформери із застосуванням модульності

- **Конструктивність** – інтеграція надійних механізмів, що забезпечують легкість трансформації та довговічність виробу.

Отже, однією з ключових характеристик меблів-трансформерів є їх **багатофункціональність**. Такі меблі можуть змінювати свою форму та функцію залежно від потреб користувача. Приклади включають ліжка, які перетворюються на шафи, столи, що трансформуються у полиці, або дивани, що стають двоспальними ліжками (рисунок 3). **Основні типи конструктивних рішень меблів-трансформерів** поділяються на *каркасний*, *безкаркасний* та *каркасний вмонтований* [4]. Конструкції сучасних меблів-трансформерів залежать від матеріалів, ергономічних вимог та ідей.



Рисунок 3

Меблі-трансформери. Дипломний проект студентки Харківської державної академії дизайну і мистецтв Надії Герман

Каркасні меблі-трансформери – це конструкції, що мають жорсткий каркас, виготовлений із металу, дерева або пластику. Вони забезпечують надійність і довговічність, часто використовуються у розкладних столах, диванах, ліжках із підйомним механізмом.

Безкаркасні меблі-трансформери – створені без жорсткої основи, зазвичай виготовляються з гнучких матеріалів, таких як текстиль або пінополіуретан. Прикладом є безкаркасні крісла-мішки або модульні дивани, які легко змінюють форму.

Каркасні вмонтовані меблі – це меблі, що інтегруються в стіни або інші конструктивні елементи приміщення. Наприклад, відкидні ліжка, вбудовані столи або складні шафи. Вони допомагають ефективно використовувати простір, особливо в малогабаритних квартирах.

Ергономічний дизайн меблів-трансформерів враховує зручність у процесі трансформації та використання. Важливим аспектом є безпечність механізмів та мінімізація фізичних зусиль під час змінення форми меблів. Завдяки сучасним механізмам трансформації, таким як *газліфти* або *пневматичні системи*, користувачі можуть легко змінювати конфігурацію меблів (рисунок 4).



Рисунок 4

Крісло-трансформер (в основі електродвигун з висувним телескопічним штоком). Дипломний проект студентки Харківської державної академії дизайну і мистецтв Дарії Тютюко

Дизайн меблів-трансформерів часто орієнтований на сучасні мінімалістичні стилі. Вони гармонійно вписуються в інтер'єри завдяки простим лініям, нейтральним кольорам та якісним матеріалам. Крім того, можливість індивідуального дизайну дозволяє створювати унікальні меблеві рішення (рисунок 5).



Рисунок 5

Місце для роботи у концепції “Домашній офіс”. Курсовий проект студентки Харківської державної академії дизайну і мистецтв Олександри Єни /абсолютний переможець VI сезону конкурсу SBID Ukraine в категорії Product Design, 2023




Сучасні **меблі-трансформери** часто **оснащені вбудованими технологіями**, такими як автоматизовані системи управління, підсвітка або вбудовані зарядні станції для гаджетів. Це підвищує їхню функціональність та комфорт у користуванні.

У виробництві меблів-трансформерів широко застосовуються екологічно дружні матеріали, такі як деревина, метал, скло та композитні матеріали. Крім того, якщо меблі *мають модульну конструкцію*, що це сприяє багаторазовому використанню та легкому ремонту.



На створення багатофункціональних і адаптивних рішень, що дозволяють оптимізувати простір і підлаштовуватися під змінні потреби користувача впливають **принципи трансформації**. Розглянемо деякі з них, а саме: принцип «збільшення / зменшення», «комбінування / поділ», лінійну та "латеральну" трансформацію [1] .



Таблиця 1 Принципи трансформації

Принципи трансформації	Приклад меблів-трансформерів	Опис прикладу
<p>«Збільшення / зменшення»</p> <p>Такий принцип базується на зміні фізичних габаритів об'єкта, як у бік збільшення, так і зменшення простору, який він займає.</p>		<p>Софа Leonie</p> <p>У представленому дивані у підлокітник вбудований механізм трансформації, який має декілька фіксованих положень, де перше положення – це диван, а останнє – ліжко.</p>
<p>«Виявлення / приховування»</p> <p>Основний упор зроблено на виявлення чи приховування поверхні елемента, окремої деталі чи комбінації кількох деталей з метою зміни основного функціонального призначення об'єкта. При цьому трансформація об'єкта може здійснюватися на кількох рівнях і торкатися певної деталі об'єкта, так і привносити загальну видозміну в його об'ємно-просторову структуру.</p>		<p>Новаторські меблі від компанії Schamburg + Alvisse</p> <p>У даному кріслі, за допомогою комбінації кількох однакових елементів, відбувається різноманітна трансформація та змінюється функціональне призначення об'єкта, а саме, - крісло може перетворюватись у ліжко, пух чи у цікавий об'єкт інтер'єру.</p>
<p>«Комбінування / поділ»</p> <p>Принцип трансформації полягає у трансформації одного об'єкта у дві та більше структури, при цьому одна з цих структур має окрему індивідуальну функціональність, забезпечення якої можливе у разі трансформації. Це може бути декілька елементів зі схожими/різними функціями, комбіновані або розділені на формування нового промислового об'єкта.</p>		<p>Диван-трансформер «Convertible Sofa»</p> <p>В даному прикладі відбувається трансформування дивану в обідній стіл з табуретками, який може зберігати всі частини комплекту всередині, не займаючи більше місця ніж вже займає.</p>



<p>«Лінійний принцип»</p> <p>Лінійний принцип має на увазі найпростішу трансформацію формотворчих елементів об'єкта і заснований на побудові плоскої кривої, всі точки якої лежать в одній площині: лінія, відрізок, вектор, сплайн, радіальна крива, коло та інші фігури геометрично не впорядкованої або вільної конфігурації.</p>		<p>Sipario – меблі, що трансформуються у робоче місце</p> <p>У даному об'єкті можна побачити лінійну трансформацію робочого місця, де трансформація відбувається за рахунок певного деформування форми.</p>
<p>«Латеральний» принцип</p> <p>"Латеральний" принцип трансформації охоплює перетворення об'ємно-просторової структури об'єкта, що відбувається за одночасним або послідовним сценарієм.</p>		<p>Стільчик Frog</p> <p>Цей об'єкт належить до категорії меблів "на виріст" і призначений для використання дітьми від 6 місяців до 10 років. Трансформація дерев'яної конструкції дозволяє регулювати висоту стільця в одному вимірі відповідно до віку користувача.</p>

Авторська розробка

Розгляд принципів трансформації у дизайні меблів відкриває нові можливості для ергономічного, технологічного та естетичного удосконалення інтер'єрів, особливо в умовах обмеженого житлового простору.

Висновок

Було розглянуто основні особливості дизайну меблів-трансформерів, їх переваги та сучасні тенденції та підтверджено, що трансформовані меблі є важливим напрямом у дизайні.

Подальший розвиток дизайну меблів-трансформерів буде орієнтований на технологічну інноваційність, гнучкість у використанні, екологічність та естетичну привабливість. **Використання розумних технологій** для керування меблями за допомогою смартфонів або голосових команд; запровадження **штучного інтелекту**; розробка **нестандартних форм і трансформацій**, що розширюють можливості використання меблів - комбінація цих факторів



сприятиме створенню меблів, які максимально відповідають потребам сучасного споживача та забезпечують комфортне й ефективне використання простору.

Література:

1. Босий І.М. Принципи формоутворення і трансформації об'єктів у дизайні меблів [Текст] : автореф. дис. ... канд. мистецтвознавства (д-ра філософії) : 17.00.07 / Босий Іван Михайлович ; Харків. держ. акад. дизайну і мистецтв. - Харків, 2018.
2. Босий І.М., Брижаченко Н.С. Футуристичні розробки меблів – трансформерів першої половини ХХ сторіччя: концепції та перспективи. Культура і сучасність : альманах. 2023. № 1. С. 56–63. УДК 749.1:74.01/.09:747.012.1
3. Голінева Н.О. Дизайн об'ємно-просторового середовищного об'єкта з використанням принципів трансформації : кваліфікаційна робота / керівник – викладач О. В. Дорогой. Кривий Ріг : КДПУ, 2023. 44 с.
4. Кузнецова І.О. Особливості типів конструкцій сучасних меблів – трансформерів. Теорія і практика дизайну. Мистецтвознавство. Вип. 9. 2016. С 121-128. УДК 684.4.05(045)1.
5. Легендарний датський дизайнер і архітектор Вернер Пантон. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https:// 4room.ua/ua/blog/ legendarnyi-datskii-dizainer-verner-panton/](https://4room.ua/ua/blog/legendarnyi-datskii-dizainer-verner-panton/).
6. Фуско Р.Д. Ле Корбюзье – дизайнер : меблі 1929 р. / Р.Д. Фуско. – М.: Радянський художник, 1986. – 107 с.

Abstract. The article explores the relevance and innovation of transformable furniture design in modern interior solutions, especially in the context of urbanization and limited living spaces. It examines key design principles such as modularity, combinatorics, and ergonomic adaptability, as well as modern trends including smart technologies, sustainability, and aesthetics. The study analyzes historical and contemporary examples, highlights the functional and spatial benefits of transformable furniture, and forecasts future developments in the field based on flexibility, eco-friendliness, and user-centered design.

Key words: transforming furniture, principles of transformation, combinatoriality, modularity, functionality, aesthetics, style, ergonomics, technologies, production.

**EMBODIMENT AS AN ARCHIVE OF MEMORY:****THE PHENOMENOLOGY OF TRAUMATIC EXPERIENCE IN CINEMA****ТІЛЕСНІСТЬ ЯК АРХІВ ПАМ'ЯТІ:****ФЕНОМЕНОЛОГІЯ ТРАВМАТИЧНОГО ДОСВІДУ У КІНЕМАТОГРАФІ****Demura A.A. / Демура А.А.**<https://orcid.org/0000-0002-5409-0836>

PhD Student / аспірантка

Kyiv National I.K. Karpenko-Karyi Theatre, Cinema and Television University

Kyiv, Yaroslaviv Val 40, 01054

Київський національний університет театру, кіно і телебачення ім. І.К. Карпенка-Карого

Київ, Ярославів Вал 40, 01054

Анотація. Стаття присвячена аналізу тілесності як засобу фіксації та трансляції травматичного досвіду в аудіовізуальній культурі. На основі феноменологічних підходів Моріса Мерло-Понті та Ділана Трігга, а також теорії втіленого глядача Вівіан Собчак, розглядаються механізми, через які тіло на екрані набуває статусу носія пам'яті. Особлива увага зосереджена на жіночому досвіді війни у фільмах «Для Сами» та «Земля блакитна, ніби апельсин», де тілесність і простір утворюють структури пізнання, опору і турботи. Тілесна репрезентація трактується як альтернативна мова пам'яті, здатна активувати глядацьку залученість на етичному й афективному рівнях. Основний внесок статті полягає у виявленні способів, за допомогою яких тілесність на екрані формує нову естетику свідчення та залучає глядача до переживання травматичного простору як етичного досвіду.

Ключові слова: тілесність, травма, феноменологія, пам'ять, українське кіно, війна, трансформація, простір, монтаж, постпам'ять.

Вступ.

У сучасному аудіовізуальному мистецтві тіло дедалі активніше постає як джерело пам'яті, свідчення і сенсорного досвіду. Візуальна мова фільму, особливо в контексті воєнних і гуманітарних катастроф, зміщується від зображення подій до фіксації станів – тілесної напруги, погляду, порушеного ритуалу. У цьому контексті тілесність виявляє здатність формувати нерациональні, афективні форми взаємодії з травматичним простором.

У межах дослідження пропонується поняття «тілесності як архіву пам'яті» – як форми візуального досвіду, в якій тіло зберігає напругу травми і транслює її через позанаративні естетичні структури. У статті аналізується, яким чином тілесний вимір екранного образу стає способом фіксації травми і формує альтернативну візуальність, побудовану на жестах, ритмах, паузах та просторових деформаціях.



Теоретичне підґрунтя становлять феноменологія сприйняття Моріса Мерло-Понті, концепція простору пам'яті Ділана Трігга, теорія втіленого глядача Вівіан Собчак та культурна теорія постпам'яті Маріанни Гірш. У фокусі – ті типи зображення, де тіло активує простір як поле етичної взаємодії. Така взаємодія виходить за межі емпатійної реакції і активує «режим візуального співпереживання», у якому глядач входить у стан співприсутності з тілесним образом. Етична візуальність у цьому контексті розуміється як форма глядацької відповідальності перед вразливим тілом на екрані – відповідальності, що ґрунтується на уважній присутності. Водночас це і форма підтримки вразливого образу, що потребує не «споживання», а «співбуття». Образ формує зв'язок між тілесністю на екрані й сприйняттям глядача, відкриваючи простір для відповідальності, впізнавання і турботливої уваги.

Феноменологічна оптика тілесної пам'яті, що лежить в основі цього дослідження, співвідноситься з ширшими поняттями сучасної аудіовізуальної теорії. Концепт естетики травми (trauma aesthetics) розглядає травматичний досвід не як сюжетну подію, а як формальну структуру (LaCapra, 1999). Замість наративної цілісності виникає поетика фрагментації, зупинок, тиші, порушень ритму й композиційної напруги. Зображення фіксує не стільки те, що сталося, скільки те, що зупинилося в часі або втратило мову.

Цей підхід близький до концепції *тактильного бачення* (haptic visuality), запропонованої Лаурою Маркс (Marks, 2002). Візуальний досвід у цьому випадку активізується не через дистанцію, а через уявну тілесну близькість – дотик, шорсткість, рух усередину поверхні кадру. Коли тіло на екрані зберігає напругу травми, глядач втягується у співпереживання не логікою оповіді, а сенсорною присутністю. Камера працює як медіатор тактильного зв'язку, де кожен рух, пауза чи погляд набуває ваги без вербального пояснення. У таких випадках тілесність функціонує як точка зустрічі між образом і свідомістю глядача, створюючи умови для афективної участі.



Основний текст.

В умовах війни, аудіовізуальні медіа дедалі частіше звертаються до тіла як до каналу пережитого. Провідні дослідники, зокрема Кеті Карут і Домінік ЛаКапра, акцентують увагу на тому, що травматичний досвід, на відміну від історичного чи біографічного, чинить опір лінійній оповіді. Його структура фрагментована, побудована на повторюваних образах, мовчаннях, розривах і емоційних сплесках, що прориваються у свідомість у несподіваних формах.

Особливого значення у цьому контексті набуває концепція «втіленого глядача», запропонована В. Собчак, яка трактує перегляд фільму як процес, у якому глядач переживає візуальне через власне тіло. Екранне зображення, особливо у випадку з тілесною репрезентацією травми, викликає не абстрактну емпатію, а фізичний відгук – тривожність, напруження, рефлекс. Глядач залучений у візуальний простір як співучасник афективної події.

Паралельно з цим, феноменологічні концепції М. Мерло-Понті та Д. Трігга розкривають тіло як простір, що містить пам'ять через дії, напруження і жести. У цьому підході тіло постає архівом – не метафоричним, а буквально тілесним, що вступає у взаємодію з простором травми, фіксуючи його як внутрішній слід.

Уявлення М. Мерло-Понті про *тіло як простір* матеріалізується у фільмі «Клондайк» (2022, Марина Ер Горбач) через побутову тілесність, що існує серед руїни. Героїня Ірка проживає у хаті, що внаслідок вибуху втратила частину стіни. Її дім – напівзруйнований, але функціонуючий, стає місцем зі стертою межею між внутрішнім і зовнішнім. Це житло без фасаду, зранене середовище, що втратило здатність бути захистом. На тлі цієї рани-простору розгортаються тілесно-побутові дії, які стають втіленням спротиву звичному руйнуванню: перегляд телевізора на дивані перед фотошпалерами з пальмами, збір помідорів зі зруйнованої вибуховою хвилею грядки, перетирання їх у томатну пасту, варіння соку та закатування банок. Такі сцени створюють глибокий контраст між воєнним контекстом і тілесним ритуалом виживання – побут тут стає формою пам'яті, актом збереження звичного порядку серед хаосу.



Окремі епізоди – похід із пластиковими бутлями до резервуару за водою, напування та доїння корови, яку згодом доведеться зарізати (щоб зрештою м'ясо відібрали бойовики) – формують сильний образ простору як зони безсилля, де тіло змушене служити логіці виживання. У цих діях немає сентименту – лише неперервна тілесна праця, яка намагається «притримати» життя у світі, що розпадається. Як стверджує Гастон Бachelар у «Поетиці простору», дім – це місце, де суб'єкт формує «поетичну інтимність», простір, у якому проживається безпека, пам'ять і мрія (Бachelар, 2020, с. 34). Руйнування дому означає злам особистісної структури буття. У випадку Ірки – втрата стіни не лише оголює інтер'єр, але й позбавляє простору внутрішньої тиші та захищеності. Фотошпалери з пальмами – іронічний символ мрії, яку тепер буквально здув вітер війни, а телевизор у відкритому просторі – протез нормальності. «Діалектика внутрішнього і зовнішнього» Г. Бachelара тут втілюється буквально: простір, що мав бути внутрішнім, перетворено на зовнішній; захист – на відкриту рану. Просторовий розлом співіснує з розломом тілесної ідентичності, де жінка – мати, господиня, цивільна – змушена існувати у тілі, що більше не належить безпеці.

У свою чергу, у фільмі «Меланхолія» (2011, Ларс фон Трієр) тіло героїні існує не в ритмі виживання, а в ритмі розпаду – воно в'язне в часі, як сам простір. Маєток, де розгортаються події, трансформується у психогеографічний простір, що повторює меланхолійний стан головної героїні. Статичні плани, плавні рухи камери, сцени тілесної бездіяльності – лежання в ліжку, купання, стояння у тумані – формують сенсорну поетику занурення, де тіло стає метафорою занепаду. Фінальна сцена – створення дитячого куреня з гілля для захисту від космічної катастрофи – символізує відчайдушний жест тілесного інстинкту: створити простір, навіть з уламків, щоб хоч якось ізолювати себе від неминучої катастрофи. Простір стає не притулком, а емоційним еквівалентом приреченості, а тіло – його останнім мешканцем.

Обидві стрічки демонструють, як тілесність і простір у кіно стають засобом мовлення про травму без мови. У «Клондайку» тіло бореться за виживання серед



уламків, у «Меланхолії» – завмирає перед катастрофою, занурюючись у стан спокійного прийняття. У кожному випадку простір втілює травму у формі, доступній глядацькому переживанню через чуттєвість.

У документальному фільмі «Для Сами» (2019, Ваад Аль–Катеб, Едвард Воттс) війна постає не як абстрактна подія чи фон для героїчної оповіді, а як щоденна втілена реальність, що проникає в найвразливіші сфери – материнство, побут, дім. Центральним фокусом стає жіночий досвід, де камера постає як емпатичний орган, що не відділяє суб'єкт від події, а включає його в простір переживання.

Фільм знято самою героїнею. Це занурює глядача у простір, де війна не описується ззовні, а відбувається зсередини – як порушення тіла, розрив звичних ритуалів, руйнування дому. Повсякденне життя зображене в сенсорній напрузі: уламки, бруд, кров, молоко – фрагменти досвіду, що не вкладається у звичні наративи. Тут немає дистанції. Є лише погляд, що триває.

Форма фільму – звернення до доньки режисерки, народженої в епіцентрі катастрофи. Це не просто хроніка подій, а лист із майбутнього минулого. Така адресація змінює тон оповіді: зйомка стає актом турботи, а не лише свідчення. Вона – спроба пояснити світ, у якому дитина з'явилася, зберегти образи для того часу, коли слова, можливо, будуть зайвими. Самозйомка фіксує цілісність героїні попри хаос зовнішнього світу. У кадрі раз у раз повторюються предмети – ковдри, іграшки, посуд. Вони є знаками присутності. У феноменологічному ключі (Merleau–Ponty, 2012; Trigg, 2012) ці речі – продовження тіла. Вони вбирають у себе загрозу, стають носіями пам'яті, вписують людське у нелюдське. Дім тут – не притулок, а напівруїна. І водночас – сцена турботи. Приготування їжі, догляд за дитиною, обійми – не сентимент, а мова опору.

Фільм фіксує стан тотального розламу: між тілом, що зазнає болю, і тілом, що змушене діяти; між домом як простором життя – і домом як руїною; між повсякденністю й екстремальним станом виживання. Але попри цю роздробленість, кадри не розпадаються. Вони тримають цілісність – жіночу,



материнську, живу. Зйомка перетворюється на жест піклування — візуальне продовження тілесної турботи.

Іншу форму цього досвіду ми бачимо у фільмі «Земля блакитна, ніби апельсин» (2020, Ірина Цілик). Він теж розгортається у жіночому погляді, на тлі війни — цього разу на Донбасі. Але оптика інша: не збереження на руїнах, а створення нового простору всередині них. Камера стає інструментом переосмислення. Мати — Ганна — разом з дітьми створює власний фільм. Не про війну, а про життя поруч із нею. Дім у цьому фільмі — простір перетворення, що функціонує як лабораторія. Тут війна — фон, а не головна дійова особа. Зйомка стає естетичним жестом, що протистоїть страху.

У цих двох фільмах жіноче тіло та простір дому — не об'єкти, а епіцентри досвіду. Вони формують епістемологічну оптику війни: не як батального видовища, а як приватного, чутливого простору. Війна не винесена «за межі», а входить у побут. Вона залишає свої найглибші сліди, проте не знищує суб'єктність. Ці сліди трансформуються у свідчення.

Якщо у «Для Сами» тіло жінки — вразливе, виснажене, втягнуте в щоденну боротьбу за життя, перебуває в стані постійного ризику, то в «Земля блакитна...» воно постає у русі трансформації. Цей фільм не лише документує травму, а змінює її через красу, гру, образ. Сцени зйомок у підвалі, експерименти з тінями, розфарбовані стіни, м'яке світло — все це творить автономну естетику всередині катастрофи, інша логіка виживання: не задля забуття, а задля творення сенсу. Війна тут присутня, але не головує. Вона — фон, який персонажі поступово перетворюють на матеріал для нового погляду. Діти у цьому процесі не виконують роль мовчазних свідків — вони стають суб'єктами оповіді, інтерпретаторами власного досвіду. Їхня участь у створенні фільму є актом суб'єктності, а не лише виживання.

В обох стрічках — «Для Сами» та «Земля блакитна...» — жіночий досвід війни не зводиться до ролі жертви. Камера, материнство, повсякденні ритуали перетворюються на мову опору, на спосіб відстояти себе в умовах руйнації. Простір дому, хоча й зраний, все ще утримує людське — не ілюзією безпеки, а



жестами турботи, моментами співбуття, творчістю. І саме ця напруга між руїною і тілесним опором, між розпадом і естетичним жестом дозволяє обох фільмам говорити про війну не через шум катастрофи, а через тишу присутності.

У цьому сенсі особливої ваги набуває формування візуальних архівів, що у майбутньому слугуватимуть джерелом постпам'яті. Як зазначає Маріанна Гірш, постпам'ять – це форма трансгенераційної пам'яті, що не походить із власного досвіду, а передається через образи, візуальні й вербальні наративи, емоційні моделі засвоєння (Hirsch, 1997, p. 22). У випадку України, де війна триває і пам'ять ще глибоко вкорінена в досвіді живих, уже сьогодні створюються аудіовізуальні ресурси – документальне кіно, цифрові щоденники, персоналізовані архіви – які матимуть тривалу культурну дію. Ці образи не лише фіксують травматичний досвід, а й творять потенціал для його подальшого осмислення наступними поколіннями, які не матимуть прямого зв'язку з війною, але житимуть у сформованому нею полі пам'яті. Дослідження цих процесів у майбутньому потребуватиме поєднання візуального аналізу з концептуальними підходами до культурної пам'яті – зокрема в перспективі постпам'яті як динамічного, естетично й етично забарвленого способу репрезентації історичної травми.

У фільмах «Швидкий бігун» (Захаріас Кунук, 2001) та «Атлантида» (Валентин Васянович, 2019) досвід травми репрезентується через граничне зіткнення тіла з простором – не як тлом події, а як активним носієм історичного сліду. Обидві стрічки зосереджуються на персонажах, що перебувають у стані радикального винятку: їхні тіла опиняються в межевому середовищі, де звичні координати буття більше не діють.

У «Швидкому бігуні» дія не артикулюється через діалог чи сюжетну логіку. Тут простір говорить першим. Арктичний ландшафт не просто обрамляє події – він виступає їх безпосереднім учасником. Сцена втечі головного героя босоніж по кризі втілює поняття «чистої тілесної пам'яті» – пам'яті, що не фіксується словами, а прописується в жесті, напрузі м'язів, ритмі дихання. Цей рух – не втеча в класичному наративному сенсі, а тілесна емансипація: прорив із



замкненого кола родинного насильства в ландшафт, який пам'ятає, але не засуджує.

Ділан Трігг у праці *The Memory of Place* (2012) пропонує концепт «тілесності середовища», в якому простір діє не як нейтральне тло, а як активний учасник у формуванні пам'яті. «Пам'ятати місце – означає пам'ятати, як тіло було в ньому», – зазначає він. У цьому сенсі біг героя по кризі є актом не стільки фізичного порятунку, скільки онтологічного жесту, що відновлює тілесну суб'єктність через сенсорну взаємодію з простором. Холод, лід, ритм дихання стають тим, що витісняє травму з площини минулого у живу, теперішню присутність.

Натомість в «Атлантиді» Валентина Васяновича тіло перебуває не в русі, а в стані знерухомлення, ізоляції, паралітичного повторення. Постапокаліптичний Донбас постає як застигле середовище й водночас функціонує як «зона винятку» — простір поза правом, поза часом, поза майбутнім. Цей термін, введений Джорджо Агамбеном (*Homo Sacer*, 1999), означає простір, у якому тіло перебуває в юридичній і соціальній суспензії – не мертво, але й не включене у політичне життя. Герой фільму – колишній солдат – навчається працювати в службі ексгумації тіл. Його щоденний ритуал – відкопування, зважування, транспортування – є монотонною тілесною дією, позбавленою сенсу, але насиченою пам'яттю.

Простір у «Атлантиді» не відображає катастрофу – він і є катастрофа. Пейзаж зруйнованих будівель, пересохлих річок, токсичних ландшафтів не пропонує ні притулку, ні опору. Це середовище, у якому тіло функціонує як залишок, залишений без перспективи. Тут тіло – не медіум майбутнього, а носій «голоного життя», що лише свідчить про факт виживання. Пам'ять не зберігається у словах – її переносять речі, руїни, залишки тіл, що лежать у землі.

Попри формальну протилежність – рух у «Швидкому бігуні» і стагнація в «Атлантиді» – обидва фільми пропонують спільну оптику: тілесність як межовий досвід, в якому простір і пам'ять зливаються в одне. У першому випадку – через сенсорну активацію і ритм, у другому – через повторення і тишу. У кожному з



них тіло перестає бути інструментом дії і перетворюється на архів – втілений, втомлений, уразливий.

Цей тип тілесної репрезентації формує нову етику візуального: пам'ять не є подією, вона передається через дотик, втому, фізичну присутність. Простір постає не як мапа, а як поверхня пам'яті – така, що її можна лише пройти босоніж або розкопати руками.

Висновки.

Аналіз аудіовізуальних репрезентацій травми у фільмах різних жанрів засвідчує зростання ролі тілесного як способу збереження і трансляції пам'яті. Екранне тіло виявляє здатність не просто фіксувати наслідки катастрофи, а структурно впливати на ритм зображення, пластику простору, динаміку кадру. Через жест, втому, погляд, через ритуал дії у зруйнованому середовищі фільм набуває властивості сенсорного архіву, в якому пам'ять не відтворюється, а активується.

Тілесність постає не як ілюстрація досвіду, а як інфраструктура афективного переживання. Такий підхід змінює оптику глядацького сприйняття: тіло на екрані формує умови для етичної взаємодії з простором, в якому відсутність слова не перешкоджає свідченню. Цей досвід вимагає залучення нераціонального рівня – уваги, що ґрунтується на дотику, втомі, тиші.

Кінофільми, проаналізовані в межах цієї роботи, створюють специфічну форму візуального свідчення, де камера функціонує як орган відчуття, а тілесна присутність героїв формує мову пам'яті. Тіло у кінематографі виявляє себе як архів, що здатен зберігати досвід без вербальної фіксації. Цей архів активується в конкретних топологіях: руїні, покинутому домі, відкритому ландшафті, щоденній рутині. У таких умовах тілесність конструює нову екранну етику – зосереджену не на репрезентації події, а на сповільненому проживанні її залишків.

Подальше дослідження втіленої пам'яті у візуальній культурі потребує розширення методологічного поля за межі феноменології – із залученням візуальної антропології, критичної теорії афектів, тілесної герменевтики.



Особливо перспективним виглядає аналіз гібридних форматів – VR - документалістики, аудіовізуальних щоденників, цифрових архівів війни – де тілесна присутність поєднується з алгоритмічним монтажем пам'яті.

Література:

1. Merleau-Ponty, M. (2012). *Phenomenology of Perception*. Trans. D. A. Landes. Routledge.
2. Trigg, D. (2012). *The Memory of Place: A Phenomenology of the Uncanny*. Ohio University Press.
3. Sobchack, V. (1992). *The Address of the Eye: A Phenomenology of Film Experience*. Princeton University Press.
4. Hirsch, M. (1997). *Family Frames: Photography, Narrative, and Postmemory*. Harvard University Press.
5. LaCapra, D. (1999). Trauma, Absence, Loss. *Critical Inquiry*, 25(4), 696–727.
6. Marks, L.U. (2002). *Touch: Sensuous Theory and Multisensory Media*. Minneapolis: University of Minnesota Press.

Abstract. This article examines embodiment as a means of registering and transmitting traumatic experience in audiovisual culture. Drawing on the phenomenological approaches of Maurice Merleau-Ponty and Dylan Trigg, as well as Vivian Sobchack's theory of the embodied spectator, the study explores how the body on screen acquires the status of a memory carrier. Special attention is given to the female experience of war in the films *For Sama* and *The Earth Is Blue as an Orange*, where embodiment and space constitute structures of knowledge, resistance, and care. Bodily representation is interpreted as an alternative language of memory, capable of engaging the viewer on both ethical and affective levels. The main contribution of the article lies in identifying the ways in which screen embodiment generates a new aesthetic of witnessing and invites the viewer to encounter traumatic space as an ethical experience.

Keywords: embodiment, trauma, phenomenology, memory, Ukrainian cinema, war, transformation, space, montage, postmemory

Науковий керівник: канд. мист., проф. Мусієнко О.С.

Стаття відправлена: 25.05.2025



FROM STAGE TO SCREEN: APPLYING SEMIOTIC COMEDY IN MODERN ENTERTAINMENT FORMATS

Gorbatyi Oleksandr

Author of Humorous Scripts for Performers in the Field of Comedy

Odessa State Medical University

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9647-5052>

Abstract. *The article focuses on analyzing the transformation of semiotic humor in the context of its transition from theatrical performance to screen-based forms of contemporary entertainment. The aim of the study is to examine how the use of semiotic humor has evolved across different forms of modern entertainment – from stage performances to digital media platforms. The research employed general scientific methods of cognition: analysis; synthesis; induction; deduction; generalization; comparison; systematization. The findings show that the evolution of semiotic humor from stage to screen reflects a gradual complication of communicative strategies. While theatrical humor primarily relied on physical expression, irony, grotesque, and dramaturgy, the rise of digital and visual media introduced complex multi-code systems. In these systems, humor emerges through the intricate interaction of visual, auditory, textual, and cultural signs. Theatre served as a foundation for interpretive play with meanings, but it was film and digital platforms that allowed this play to scale to a global level. It was found that in the visual-screen environment, semiotic humor acquired new qualities thanks to technical and expressive tools such as editing, color, camera angles, and sound intonation. The study demonstrates that contemporary digital platforms, particularly social media, have transformed humor into a horizontal practice: humorous content no longer belongs solely to the creator but is shaped through interaction with the audience. Memes, videos, and emojis were explored as dynamic sign units that serve aesthetic, social, and ideological functions. The conclusion states that humor in modern entertainment is not just a form of leisure but an effective cultural code and means of communication within post-media culture. The transition from stage to screen marks a paradigm shift: humor becomes a scalable interpretive tool functioning in art, advertising, social interaction, and digital exchange. The practical significance of the study lies in its potential application for analyzing contemporary cultural practices, digital content, and communication strategies within the media space.*

Keywords: *semiotics, humor, media, culture, interpretation.*

Introduction

Throughout human history, entertainment has played a central role in the social, cultural, and psychological life of society. Its forms have evolved alongside technological advancements and changing social needs, yet its core function has remained constant – providing emotional release, shared experiences, and symbolic navigation in a complex world. From ritual games, theatrical performances, and urban carnivals to cinema, digital content, and interactive media, entertainment has always reflected the dominant values of its time, acting both as a cultural mirror and a tool for shaping new behavioral models.



Among various forms of entertainment, humor holds a special place as a universal mode of communication that entertains, integrates, satirizes, and critically engages with social realities. It is not a secondary element but often a structural component that sets the tone and determines how the audience interacts with content. Through humor, societies construct and transmit cultural identity codes, create distance from traumatic experiences, or, conversely, highlight tensions through irony and satire. In this context, studying humor as a semiotic phenomenon in contemporary forms of entertainment offers deeper insights into the communicative function of laughter within cultural dynamics.

The use of semiotic humor in contemporary entertainment – from stage to screen – remains insufficiently addressed in scholarly literature. Most existing studies tend to focus on either specific aspects of semiotics or humor in media, while a comprehensive analysis of how humorous codes transform across different entertainment platforms is lacking. Therefore, the topic carries an original perspective and introduces a novel contribution to the field.

Literature Review

In order to conduct this study, scholarly sources from various disciplines were analyzed. In the field of humor linguistics, significant contributions include the work of S. Attardo [2], while modern intercultural aspects are addressed in the study by J.M. Al-Issawi, W. AlAhmad, and N.W. Awajan [1]. In film studies, notable references include the works of M. Brodovicz [3] and V. Chandrana, S. Jagadisana [4], which provide examples of semiotic codes in cinema. More theoretical and philosophical perspectives are offered by D. Davis [5], as well as the classical approaches to semiotics presented in the writings of U. Eco [6] and C.S. Peirce [11]. In the domain of digital media, important insights come from M. Hasyim, B. Arafah [7], and A. Primadipta et al. [12], who examine visual humor and its role in social media. Stage and physical humor are explored in the works of M. Keisalo [8] and W. Krynski, R. Mikkanen [10], while the directorial perspective is addressed in the study by M. Krypchuk et al. [9]. In advertising, semiotic humor is discussed in the work of G.B.R. Saputra and E. Santoso [13].



The study also draws on expert sources from modern online publications such as Artforum, aithor.com, and Multidisciplinary Science Journal, which highlight current developments in media and humor through the lens of semiotics.

Despite the considerable number of works devoted to specific aspects of the topic, there is a noticeable lack of systematized material on the application of semiotic humor in modern entertainment formats. For this reason, various scientific methods were used to analyze, group, and systematize information and present it in accordance with the research topic.

Purpose of the article

The aim of the study is to examine how the use of semiotic humor has evolved across different forms of modern entertainment – from theatrical performance to digital media platforms. In order to achieve this aim, the study sets out to define the theoretical foundations of semiotics and the features of humor as a semiotic phenomenon; describe the specifics of its function in theatrical art; and analyze the transformation of approaches to understanding humor in other forms of entertainment content, particularly in cinema and social media.

Research results

Semiotics is the science of signs and sign systems that studies how meanings are created, interpreted, and function within the framework of cultural exchange. According to the classic definition by Charles S. Peirce, a sign is something that stands for something else to someone in a particular context [11]. Signs do not exist in isolation — they operate within systems where their meaning is shaped by relationships with other signs, social codes, and context [6]. In the context of the humanities, semiotics becomes a tool for analyzing communication not only at the level of linguistic messages but also through visual, bodily, auditory, and kinetic signs. It provides a deep understanding of how meaning is produced in texts, performances, visual media, and particularly in humorous forms.

Humor, in turn, is a complex semiotic phenomenon that emerges from play with signs, disrupted expectations, and the subversion of conventional perception codes. From a semiotic perspective, humor operates as a mechanism of double interpretation:



the comic effect arises when a single message can be understood in at least two incompatible ways [2]. This incongruity is a key condition for generating humor – the collision between the expected and the actual, the formal and the contextual.

The semiotics of humor involves analyzing both the material components of the message (gestures, words, shots) and the cultural codes that determine which displacements are perceived as funny. As noted by M. Keisalo, the humorous sign does not always convey a clear message. Humor often functions as an open, “floating” signifier, capable of suggesting different – and sometimes opposing – meanings depending on the context. This creates a risk of meaning being reduced when figures of humor are interpreted as either universal or empty. Instead, the author suggests a balance between the openness of humorous interpretation and structural grounding: comic figures may be ambivalent, but their inventiveness is still rooted in established cultural patterns [8]. For instance, clown characters may parody social norms or reinforce them – such as when they promote collective labor or moral behavior. This shows that humor is not limited to critique or carnivalesque inversion – it can also serve normative communicative functions.

Semiotic humor within theatrical performance emerges as an element of artistic practice that reveals deep cultural processes through the play of signs, symbols, and codes. Theatre does not merely present comic plots but constructs a multilayered system of signs, where humor appears as an aesthetically structured message requiring interpretation [9]. In this sense, theatre becomes a laboratory for exploring how comedic effects arise from cultural collisions, irony, parody, or grotesque. A stage production acts as a text that activates the viewer’s interpretive mechanisms, inviting participation in a humorous dialogue.

Contrary to reductive views of humor as purely subjective or “automatic” emotional response, semiotics enables the analysis of the internal structure of comedy, identifying which signs, symbols, and contexts contribute to humorous situations [9]. As a result, theatre becomes not just a site of comedic representation but a space of complex communication, where the “code of laughter” is formed through the interaction between the work, the viewer, and cultural tradition.



Moreover, the humorous work creates its own interpretive framework, comprehensible only to a recipient who possesses the relevant cultural background. In this receptive model, the artist ceases to be the sole generator of meaning, delegating interpretive authority to the viewer, whose reactions – whether laughter, critique, or irony – shape the final significance [9].

With the development of postdramatic theatre, the semiotic understanding of corporeality undergoes redefinition. Whereas the body was once considered a somatic vehicle for expressing psychological or verbal content, contemporary performance interprets the body as an independent sign – as *Leiblichkeit*, or the phenomenon of bodily being that is not reducible to rational communication [10]. This transformation signals a shift in the foundations of theatrical representation, where nonverbal elements (movement, posture, presence) acquire symbolic value independent of dialogue or narrative. However, this semiotization of the body presents researchers with the challenge of finding an interpretive language capable of encompassing both the materiality of the body and its function within the performative sign system.

Thus, the stage becomes a space for visual-semiotic play, where ironic, grotesque, or contrapuntal bodily expressions add additional layers of humor – not mediated through language but rich in symbolic connotations.

In the transformation of humor from stage to screen, visual semiotics plays a decisive role. Film, television, and digital platforms utilize a complex system of signs, including editing, lighting, color palettes, camera movement, as well as sound and silence – all functioning as tools for conveying comedic meaning [9]. In this context, the viewer is not a passive consumer of humor but an active “reader” of the visual text, decoding layered semantic messages.

Semiotics reveals what is “invisible” in the humorous texts of film and television – the ideological and cultural layers that remain hidden from superficial reading. Through this lens, humor in audiovisual media becomes not merely a form of entertainment but a mode of symbolic representation of social reality, balancing expression with critique, pleasure with deconstruction.



These processes reach an even deeper dimension when humor interacts with architectural form. Visual gestures in contemporary architecture – tilted façades, decorative volumes, “excess” elements – function as analogues to theatrical or cinematic tropes, operating as metaphors or parodies that deconstruct and simultaneously satirize the very concept of structure [5]. In such cases, humor extends beyond art as form, becoming a cultural gesture that reflects the ambivalence of contemporary aesthetics.

In recent decades, humor has undergone active transformation, moving beyond the domains of stage and literature and integrating into numerous areas of modern culture – particularly in commercial, digital, and visual practices. Today, humor not only accompanies entertainment but increasingly serves as a key tool of strategic communication, branding, and building emotional connections with audiences. This trend is especially evident in advertising, digital marketing, social media, and the travel and tourism sector, where humorous strategies acquire new functional relevance.

In advertising, humor has traditionally been viewed as an effective way to attract attention to a brand, aid message retention, and create a positive image [13]. However, its effectiveness largely depends on the context of perception – cultural codes, gender differences, and the sensitivity of the target audience. For example, in the case of Djarum 76, humor became a powerful tool for constructing a mental image of the brand, but in times of social tension (such as the COVID-19 pandemic), humor must be used with particular care to avoid unethical or misinterpreted messaging [13].

From a semiotic perspective, humorous elements in advertising discourse serve not only as entertainment but as components of a sign system that encodes brand values, emotional cues, and social ideals. Humor in advertising fulfills the function of “emotive coding,” triggering processes of selective attention, perception, and memory [13]. As a result, humor becomes a means of establishing long-term emotional bonds between brand and consumer – a critical factor for integrated communication.

In the digital era, humor is actively adapting to visual formats – memes, short videos, graphic series – which serve as primary communication channels in social media. This trend is gaining increasing importance in tourism marketing. Empirical



observations show that visual humor (as opposed to textual) generates significantly higher user engagement, evokes positive emotional responses, increases loyalty, and strengthens brand identification [12].

The semiotic approach to analyzing visual humor allows images to be interpreted as signs that carry both material markers and conceptual meanings. For example, the visual metaphor of “the fleeting nature of life” depicted through the dynamic image of a car illustrates how a humorous sign encodes experience, emotion, and social imagination [12]. In this context, humor functions as a semiotic mediator between the brand and the consumer, translating abstract values into concrete symbols.

Moreover, the use of humor in digital marketing relies on complex psychological and linguistic mechanisms: theories of relief, incongruity, and superiority explain how and why humor creates emotional impact, releases tension, challenges social taboos, or, conversely, reinforces social norms [12]. Applying these mechanisms in advertising or visual travel presentations opens new possibilities for customer-oriented communication.

Humor is increasingly integrated into other spheres of cultural production – from tourism campaigns to architectural design, from branded interactive platforms to urban installations. In these cases, humor goes beyond attracting attention or entertaining; it also serves as a tool for social commentary, symbolic representation, or even transgression. Companies that incorporate humor into their communication strategies operate with signs of high emotional density, capable of provoking not only laughter but also social reflection.

This process demonstrates the expansion of humor’s functions as a semiotic category – from a local sign to a global communication mechanism. In advertising and tourism, humor is no longer just a tool for grabbing attention; it becomes a form of cultural language that adapts to new technological, social, and psychological conditions of consumption.

As humor evolves alongside cultural shifts, it increasingly moves beyond traditional stages and texts into visual, audiovisual, and digital spaces. One of the first mediums to adapt semiotic humor in new forms was cinema – an art form in which



meaning is constructed through a complex system of signs, including color, editing, music, and performance. Studies show that film uses symbolic frame overload, metaphorical compositions, and rhythm to generate comic effect, often disrupting the viewer's expectations regarding content or style [3]. For example, in Alfred Hitchcock's *Vertigo*, the spatial motif of the spiral, the specific color palette, and optical effects not only convey the protagonist's psychological state but also create visual allusions with ironic or grotesque undertones. In a semiotic context, humor in film functions through multiplicity of meaning – it emerges at the intersection of symbolic levels, tonal play, visual coding, and audience decoding [4].

This interpretive play with signs continues in the digital space – particularly on social media, where memes have become a primary form of humorous communication. Unlike film, where meaning is directed by the author, memes foster a horizontal model of humor – authorship is dispersed, and the humorous effect depends on context and the audience's cultural awareness [1]. Semiotic analysis of memes reveals not only their literal content but also a connotative level – hidden social allusions, ironic responses to political events, or the transformation of everyday situations into satirical scenarios. By combining the visual, linguistic, and cultural, memes create a new paradigm of communicative humor that merges complexity with immediacy.

This type of communication is expressed in an even more simplified form through emojis – standardized visual symbols that have become a key element of everyday digital interaction. Emojis exemplify semiotic units that combine the signifier (the graphic symbol) and the signified (emotional, cognitive, or pragmatic meaning) in a compact form [7]. Within multimodal communication, emojis function as socio-semiotic resources: they convey irony, sarcasm, or support, enhancing or modifying the meaning of a verbal message. Their function goes beyond emotional tagging – emojis become part of the language, adding an extra layer of meaning that can shift the tone of a message or create comic ambiguity.

All of this demonstrates that as humor transforms, it penetrates deeper into the expanding landscape of digital communication. From the layered symbolism of cinema to the minimalism of emojis, semiotic humor adapts to new channels and practices,



maintaining its ability to activate cultural reflection, evoke emotional responses, and shape new modes of interaction. Contemporary humor is no longer merely a function of entertainment – it becomes a way of thinking, a method of social navigation, and a mechanism of symbolic integration in a post-media world.

Conclusions

The evolution of semiotic humor from stage to screen reflects a gradual complication and expansion of communicative strategies in the modern cultural landscape. While stage humor was primarily shaped through physical expression, irony, grotesque, and dramaturgy, the development of visual and digital media transformed it into multi-code systems where the comic emerges from a complex interplay of visual, auditory, textual, and cultural signs. Theatre laid the foundation for interpretive play, but it is film and digital platforms that scaled this play to a global level.

In the visual-screen format, semiotic humor has acquired new qualities through editing, color, camera angle, and intonation – both in cinema and in digital video content. Modern platforms, especially social networks, have made humor horizontal – it no longer belongs solely to the creator but is shaped through interaction with the audience. Memes, videos, and emojis function as dynamic sign units that fulfill aesthetic, social, and ideological roles simultaneously. Thus, humor is no longer just entertainment – it becomes a cultural code and a mode of communication within post-media culture.

The transition from stage to screen, therefore, is not merely a change of format but a shift in paradigm: semiotic humor evolves from a localized aesthetic phenomenon into a flexible and scalable interpretive tool that operates across art, advertising, social interaction, and digital exchange. It adapts to new technological conditions while retaining its capacity to encode, subvert, and transform cultural meanings in real time.



References

1. Al-Issawi J.M., AlAhmad W., Awajan N.W. Linguistic and semiotic analysis of memes with English and Arabic humor captions. *Journal of Intercultural Communication*, 2024, №4, 115–133. URL: <https://doi.org/10.36923/jicc.v24i4.962>
2. Attardo, S. (1994). *Linguistic Theories of Humor*. Berlin: Mouton de Gruyter. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Linguistic_Theories_of_Humor.html?id=F EWC4 3MrO0C&redir_esc=y
3. Brodovicz M. Semiotics in films: theory, functions and examples. aithor.com, 2024. URL: <https://aithor.com/essay-examples/semiotics-in-films-theory-functions-and-examples>
4. Chandrana V., Jagadisana S. Analysing the role of semiotics in films – from an architect's perspective. *Multidisciplinary Science Journal*, 2024. URL: <https://doi.org/10.31893/multiscience.2024ss0326>
5. Davis D. The death of semiotics (in late modern architecture), the corruption of metaphor (in post-modernism), the birth of the punctum (in neomania). *Artforum*, 2024. URL: <https://www.artforum.com/features/the-death-of-semiotics-in-late-modern-architecture-the-corruption-of-metaphor-in-post-modernism-the-birth-of-the-punctum-in-neomania-207762>
6. Eco, U. (1976). *A Theory of Semiotics*. Bloomington: Indiana University Press. URL: <https://raggeduniversity.co.uk/wp-content/uploads/2025/01/A-Theory-of-Semiotics-Umberto-Eco-1979.pdf>
7. Hasyim M., Arafah B. Semiotic multimodality communication in the age of new media. *Studies in Media and Communication*, 2023, №1, 1–10. URL: <https://doi.org/10.11114/smc.v1i1.5865>
8. Keisalo M. A semiotics of comedy: moving figures and shifting grounds of Chapayeka ritual clown performance. *HAU: Journal of Ethnographic Theory*, 2016, №2, 223–240. URL: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.14318/hau6.2.010>
9. Krypchuk M., Nabokov R., Rozhkovska V., Chepura K., Sukhomlyn H. Semiotic field of directing at the beginning of the XXI century. *Salud, Ciencia y*



Tecnología – Serie de Conferencias, 2024, №3, 1009. URL: <https://doi.org/10.56294/sctconf20241009>

10. Krysinski W., Mikkanen R. Semiotic modalities of the body in modern theater. *Poetics Today*, 1981, №3, 141–161. URL: <https://doi.org/10.2307/1772469>

11. Peirce, C. S. (1931–1958). *Collected Papers of Charles Sanders Peirce* (Vols. 1–8, C. Hartshorne & P. Weiss, Eds.). Cambridge, MA: Harvard University Press.

12. Primadipta A., La Mani, Hervindo R., Mayer P.A., Indra R. The use of visual humor on travel companies Instagram: semiotic perspective. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2023, №2, 110–119. URL: <https://www.jatit.org/volumes/Vol101No2/13Vol101No2.pdf>

13. Saputra G.B.R., Santoso E. Adult humour in advertisement: a semiotic study of don't aviation and mint video. *Jurnal Komunikasi Profesional*, 2021, №5, 414–430. URL: <https://doi.org/10.25139/jkp.v5i5.3913>



CONTENTS

Innovative engineering, technology and industry

- | | |
|---|----|
| https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-035
ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL EFFORT OF CONNECTING
BRIDGE DESTRUCTION DURING PACKAGING MANUFACTURING
WITH FLAT DIE-CUTTING PRESSES
<i>Loizyk V.V., Bryndas A.M., Ternytskyi S.V.</i> | 3 |
| https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-038
IMPLEMENTATION OF A TARGETED MODEL OF TESTING
ROLLING STOCK COMPONENTS
<i>Grebeniuk S., Grebeniuk V.
Liamzyn A., Ukrainskyi Y.</i> | 9 |
| https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-043
INCREASING THE POST-REPAIR DURABILITY OF HYDRAULIC
PUMPS OF THE NSh-K MODIFICATION BY USING EPILAM
COATINGS ON THE WORKING SURFACES OF THE PARTS
<i>Melyantsov P.T.</i> | 14 |
| https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-044
INTERNATIONAL ECONOMIC INTEGRATION AS A FACTOR
OF ECONOMIC DEVELOPMENT
<i>Roshka Petru</i> | 27 |
| https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-057
TREATMENT OF WASTEWATER FROM THERMAL POWER
PLANTS AND THE EVALUATION OF A PHYSICO-
ELECTROCHEMICAL PURIFICATION METHOD
<i>Tychkovskyi S.I., Chelyadyn L.I.</i> | 52 |
| https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-062
AUTOMATED CONTROL OF THE PROCESS OF SORTING FRUIT
AND VEGETABLE RAW MATERIALS WITH MONITORING
ENERGY CONSUMPTION TO INCREASE THE ENERGY
EFFICIENCY OF PRODUCTION
<i>Tsvirkun L.O., Omelchenko O.V., Tsvirkun S.L.
Perekrest V.B., Galintovsky V.K.</i> | 61 |
| https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-064
MULTICRITERION OPTIMIZATION AT EVOLUTIONARY
SEARCH FOR TUBULER GAS HEATERS
<i>Dudkin K.V., Irodov V.F.</i> | 67 |



Computer science, cybernetics and automatics

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-013> 72

A CONCEPTUAL MODEL FOR BALANCE BETWEEN SECURITY AND USABILITY IN SOFTWARE

Krykhivskyi M. V.

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-036> 80

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ENERGY EFFICIENT ETHERNET (EEE) TECHNOLOGY IN ETHERNET NETWORKS

Nesterenko S. A., Alokhin A. O.

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-048> 89

DEVELOPMENT OF A MOBILE APPLICATION FOR REMINDER ABOUT TAKING MEDICINES

Altukhova T. V., Sergienko L. H., Sergienko O. O.

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-083> 109

AI SOLUTIONS IN BUILDING NATIONAL CYBER MONITORING AND CRISIS INCIDENT MANAGEMENT SYSTEMS

Rudnytskyi O.

Development of transport and transportation systems

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-014> 121

INCREASING INFORMATION AT INTERSECTIONS WITH THE ORGANIZATION OF A SPLIT PHASE DISTRACTS

Prokhorchuk M.

Architecture and construction

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-034> 129

INVESTIGATION INTO AI-ASSISTED OPTIMIZATION OF THIN-WALLED CROSS-SECTIONS

*Movchan O., Hryhorovych M.
Dikarev K., Kutsenko-Skokova A.*

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-079> 156

AI-DRIVEN QUALITY ASSURANCE IN SME CONSTRUCTION: AN IoT-BASED COST OPTIMIZATION CASE STUDY

Protopopova Z. V.

**Art history and culture**

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-010> 166

**FEATURES OF THE DESIGN OF MODERN TRANSFORMER
FURNITURE**

Khomenko M.

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-065> 175

**EMBODIMENT AS AN ARCHIVE OF MEMORY: THE
PHENOMENOLOGY OF TRAUMATIC EXPERIENCE
IN CINEMA**

Demura A.A.

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj31-01-082> 185

**FROM STAGE TO SCREEN: APPLYING SEMIOTIC COMEDY
IN MODERN ENTERTAINMENT FORMATS**

Gorbatyi O.



Scientific publication

International periodic scientific journal

ScientificWorldJournal

Issue №31

Part 1

May 2025

Indexed in
INDEXCOPERNICUS
high impact factor (ICV: 73)

Articles published in the author's edition

*Academy of Economics named after D.A. Tsenov
Bulgaria jointly with SWorld*

Signed: May 30, 2025

e-mail: editor@sworldjournal.com

site: www.sworldjournal.com



www.sworldjournal.com