



TECHNICAL, AGRICULTURAL AND MATHEMATICAL SCIENCES: SCIENTIFIC TRENDS, PROBLEMS AND WAYS OF THEIR DEVELOPMENT

Collective monograph

ISBN 979-8-89692-717-4

DOI 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2

BOSTON(USA)-2025

ISBN – 979-8-89692-717-4

DOI – 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2

*Technical, agricultural and
mathematical sciences: scientific
trends, problems and ways of
their development*

Collective monograph

Boston 2025

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

ISBN – 979-8-89692-717-4

DOI – 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2

Authors – Charka R., Bobalo I., Vasyliuk S., Monka N., Lubenets V., Vishnevskyi D., Hrytsyuk L., Ambros O., Kaplin M., Makarov V., Bilan T., Shcherbyna Y., Mysak I., Mysak P., Yurasova O., Lys S., Коломійцев О.В., Любченко О.В., Третьяк В.Ф., Філіппенков О.В., Катунін А.М., Gachechiladze L., Samkharadze R., Giorgadze G., Karavatskii P., Kozachok L., Kozachok A., Simbirskii G., Возниця А.С., Шабанова-Кушнарєнко Л.В., Налапко О.Л., Литвиненко О.І., Шапошнікова О.П., Капран Є.С., Шевченко С., Жданова Ю., Білоус М., Andrushchak I., Ковальчук Ю.О., Ключко О.Ю.

REVIEWER

Ivan Katerynychuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Worker of Education of Ukraine, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology, Professor of the Department of Telecommunication and Information Systems of Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine.

Kostiantyn Dolia – Doctor of Engineering, Department of automobile and transport infrastructure, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”.

Published by Primedia eLaunch

<https://primediaelaunch.com/>

Text Copyright © 2025 by the International Science Group(isg-konf.com) and authors.

Illustrations © 2025 by the International Science Group and authors.

Cover design: International Science Group(isg-konf.com). ©

Cover art: International Science Group(isg-konf.com). ©

All rights reserved. Printed in the United States of America. No part of this publication may be reproduced, distributed, or transmitted, in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. The content and reliability of the articles are the responsibility of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.

Collection of scientific articles published is the scientific and practical publication, which contains scientific articles of students, graduate students, Candidates and Doctors of Sciences, research workers and practitioners from Europe and Ukraine. The articles contain the study, reflecting the processes and changes in the structure of modern science.

The recommended citation for this publication is:

Technical, agricultural and mathematical sciences: scientific trends, problems and ways of their development: collective monograph / Charka R., Bobalo I., Vasyliuk S., Monka N., Lubenets V. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2025. 454 p. Available at : DOI – 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2

TABLE OF CONTENTS

1.	AGRONOMY	
1.1	Charka R.¹, Bobalo I.¹, Vasyliuk S.¹, Monka N.¹, Lubenets V.¹ EFFICIENT GROWTH-PROMOTING AGENTS: THIOSULFONATE AND BIOCOUPLE COMBINATIONS ¹ Department of Technology of Biologically Active Compounds, Pharmacy and Biotechnology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine	8
2.	ARCHITECTURE, CONSTRUCTION	
2.1	Vishnevskyi D.¹ DIGITAL TECHNOLOGIES IN URBAN CONSTRUCTION AND SPATIAL PLANNING: INTEGRATION OF BIM AND VISUALIZATION TOOLS (REVIT, 3DS MAX, AUTOCAD) ¹ O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv	22
2.2	Hrytsyuk L.¹, Ambros O.¹ ADAPTIVE HOSPITALITY DESIGN IN HERITAGE BUILDINGS: STRATEGIES FOR CONTEMPORARY USE ¹ Department of architectural design and engineering, Lviv Polytechnic National University	83
3.	ENERGY	
3.1	Kaplin M.¹, Makarov V.¹, Bilan T.¹, Shcherbyna Y.¹ METHOD OF MAPPING THE TOPOLOGY OF INTERCONNECTED NETWORKS INTO THE STRUCTURE OF THE TECHNOLOGICAL MATRIX OF THE PRODUCTION-TYPE MODEL ¹ General Energy Institute of NAS of Ukraine, Kyiv	92
3.2	Mysak I.¹, Mysak P.¹ STRATEGIC TRADING IN BRENT OIL: EVALUATING THE PROFITABILITY OF CONTRARIAN TECHNICAL APPROACHES ¹ Department of Hydraulic and Water Engineering, Lviv Polytechnic National University	99
3.3	Mysak I.¹, Mysak P.¹ INTELLIGENT DECISION-MAKING IN ENERGY FINANCE: THE ROLE OF REINFORCEMENT LEARNING ¹ Department of Hydraulic and Water Engineering, Lviv Polytechnic National University	110

3.4	Yurasova O. ¹ , Lys S. ¹ ANALYSIS OF MODE-ADJUSTMENT TESTS OF BOILER ТПП-312А ¹ Department of Heat Engineering and Thermal and Nuclear Power Plants, Lviv Polytechnic National University	121
4.	INFORMATICS AND CYBERNETICS	
4.1	Коломійцев О.В. ¹ , Любченко О.В. ¹ , Третяк В.Ф. ² , Філіппенков О.В. ³ , Катунін А.М. ² МЕТОД ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У КАБЕЛЬНІЙ ВОЛОКОННО- ОПТИЧНІЙ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ FTTH НА ОСНОВІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» ² Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба ³ Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки	129
5.	INFORMATICS, COMPUTING AND AUTOMATION	
5.1	Gachechiladze L. ¹ , Samkharadze R. ² , Giorgadze G. ³ , Karavatskii P. ³ SIMULATION OF VISUALIZATION PROCESSES OF RAM MANAGEMENT VIA VN NETWORK ¹ Department of Information Technologies, Georgian Technical University ² Department of Software Engineering, Georgian Technical University ³ Department of Computer Engineering, Georgian Technical University	163
5.2	Kozachok L. ¹ , Kozachok A. ² МОДЕЛЮВАННЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ ДВИГУНА ЗА ДОПОМОГОЮ ТРИГЕРНИХ ПІДСИСТЕМ ¹ Department of Informatics and Apply Mathematics, Kharkiv National Automobile and Highway University ² Project Manager, Kharkiv	175
5.3	Simbirskii G. ¹ NEURAL NETWORKS AS A NECESSARY COMPONENT FOR MODERN METHODS OF SEARCHING FOR ANOMALIES IN VIDEO SEQUENCES ¹ Department of Software Engineering, Faculty of Software Engineering and Business, Kharkiv National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine	184

5.4	Simbirskii G.¹ SOFTWARE DEVELOPMENT ROAD SAFETY SYSTEM ¹ Department of Software Engineering, Faculty of Software Engineering and Business, Kharkiv National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine	227
5.5	Возниця А.С.¹, Шабанова-Кушнарєнко Л.В.², Налапко О.Л.³, Литвиненко О.І.⁴, Шапошнікова О.П.², Капран Є.С.⁵ СУКУПНІСТЬ МЕТОДІВ ВИРІШЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ЗАВДАНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ¹ Державне некомерційне підприємство Державний університет “Київський авіаційний інститут”, м. Київ, Україна ² Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна ³ Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ, Україна ⁴ Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна ⁵ Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна	264
5.5.1	РОЗРОБКА МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОПУЛЯЦІЙНОГО АЛГОРИТМУ	265
5.5.2	РОЗРОБКА МЕТОДУ ОБРОБКИ ГЕТЕРОГЕННИХ ДАНИХ В ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ	273
5.5.3	МЕТОД ОЦІНКИ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ СИСТЕМ РАДІОЗВ’ЯЗКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	281
5.6	Шевченко С.¹, Жданова Ю.¹, Білоус М.² АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗКЛАДУ ЗАНЯТЬ ЯК НЕОБХІДНА УМОВА ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗАКЛАДУ ОСВІТИ ¹ Department of Information and Cyber Security named after Professor Volodymyr Buryachok, Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University ² Department of Software Engineering, State University of Information and Communication Technologies	296
6.	MATH	
6.1	Andrushchak I.¹ CONSIDERATION OF THE MAIN METHODS AND DIRECTIONS OF RESEARCH IN ASYMPTOTIC ANALYSIS OF STOCHASTIC NETWORKS ¹ Lutsk National Technical University	309

7.	MECHANICAL ENGINEERING	
7.1	Ковальчук Ю.О. ¹ ЛАЗЕРНЕ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ¹ кафедра агроінженерії, Уманський національний університет	324
7.1.1	ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ 65Г ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ	324
7.1.2	ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ 45 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ	332
7.1.3	АНАЛІЗ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В РЕЗУЛЬТАТІ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ІЗ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ	341
7.1.4	ЛАЗЕРНА ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ З ЧАВУНУ	350
7.1.5	ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО МЕТОДУ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ІЗ ЧАВУНУ	362
8.	METALLURGY	
8.1	Ключко О.Ю. ¹ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ЧАВУННИХ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ ¹ Кафедра сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні, Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна	373
8.1.1	ХАРАКТЕРИСТИКА, УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛУ ЧАВУННИХ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ	373
8.1.2	ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТА СПОСОБИ ВИРОБНИЦТВА ВІДЦЕНТРОВОЛИТИХ ВАЛКІВ	379
8.1.3	ПРОКАТНІ ВАЛКИ ІЗ ВИСОКОХРОМИСТОГО ЧАВУНУ	381
8.1.4	ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОХРОМИСТИХ ВАЛКІВ	382
8.1.5	ОЦІНКА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ У МАСИВНИХ ВИЛИВКАХ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЧАВУНУ ТА ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ЙОГО ВЕЛИЧИНУ	389
8.1.5.1	МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ СИСТЕМИ ВИЛИВКА – ЛИВАРНА ФОРМА В ПЕРІОД КРИСТАЛІЗАЦІЇ ВАЛКА	389
8.1.5.2	МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОВИМІРНОЇ ЗАДАЧІ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ В ПРОЦЕСІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ВАЛКА	396
	REFERENCES	421

SECTION 1. AGRONOMY

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.1.1

1.1 Efficient growth-promoting agents: thiosulfonate and biocouple combinations

Without the use of modern agricultural chemicals, it is impossible to obtain high yields of many important crops. Along with the use of mineral and organic fertilizers, herbicides and pesticides, plant protection products, the use of plant growth regulators is also of great importance [1].

Modern plant growth regulators are indispensable for increasing seed germination and germination energy. They can boost plant immunity, resistance to unfavorable growing conditions and stressful situations, accelerate flowering and fruiting, increase yields, and ensure the ecological purity of the harvest [1].

Recently, a significant number of drugs have appeared that are called immunomodulators or phytohormones, so one might think that these drugs save from all kinds of diseases and pests. That is why it is important to clearly understand what these drugs are, how effective they are, how they differ, and how they are used. All these drugs are plant growth regulators. Suppressing pests and inhibiting the action of plant pathogens (fungi, bacteria, and viruses) is not the main task of these drugs. First and foremost, they are powerful biostimulants [1].

It should be noted that growth regulators only have a positive effect if the general principles of growing and caring for specific plants are not violated. Thus, if the technology of crop cultivation is violated, weeds, pests, and diseases are not controlled, and plants lack macro- and microelements of mineral nutrition, then no preparations, including growth regulators, will help increase the yield [1].

Among the many definitions of growth regulators, the one given by L. J. Nickell is particularly informative. Plant growth regulators are natural or synthetic chemicals used to treat plants in order to alter their life processes or structure to improve their quality, increase yield, or facilitate harvesting. Phytohormones are chemicals produced

in plants that coordinate their growth and development. Thus, the term “growth regulator” includes natural phytohormones and synthetic compounds [2].

Plant hormones were discovered relatively recently. In the 1920s and 1930s, interest in research in this area grew when the hormone indole-3-acetic acid (IAA) was isolated. Research was conducted in the Netherlands by a group of scientists led by F. Vent, F. Kegel, and A. Hagen-Smith. At about the same time, Japanese researcher E. Kurosawa studied substances that cause hypertrophic growth in rice, now known as gibberellin phytohormones. Soviet scientists also made a significant contribution to the development of the theory of hormonal regulation: biologist N.G. Kholodny, botanist N.A. Maksimov, physiologist M.Kh. Chaylakhian, and others [2].

According to modern theory, phytohormones regulate numerous processes of plant life at all stages of life – from embryo development to the complete end of the life cycle. The use of regulators allows changing the processes of plant growth and development, controlling the processes of flowering, transition to dormancy and emergence from it, and organ formation [2].

Growth regulators act similarly to mammalian hormones, exhibiting high biological activity. This allows them to be used in low doses – at the level of grams or milligrams of active ingredient per hectare [2].

Plant hormones are classified according to their chemical nature or physiological effect. Growth regulators can be divided into stimulating substances – activators – and compounds that inhibit physiological and biochemical processes – inhibitors. Growth activators include auxins, gibberellins, and cytokinins, while abscisic acid and ethylene inhibit plant growth and development processes [2].

The mechanism of action of phytohormones is largely similar to that of animal hormones, although it is less well understood. Each hormone has its own specific receptor located in the membranes of target cells. The mechanism of action of some hormones is based on their ability to penetrate the cell and form a complex with nuclear receptors there. Other hormones are capable of altering the activity of metabolic stages or the cytoplasmic concentration of a particular ion, resulting in a cellular response. The signaling system of plant cells receives, amplifies, and transmits the primary

intracellular signal to the genome. During signal transmission within the cell, secondary small molecules, also called messengers, are involved in the process. As a result of their participation, the signal spreads faster throughout the cell. Messengers can control many processes in the cell. Among the many messengers, calcium cation can be singled out, as it is considered universal [2].

Today, plant growth regulators have found practical application in the following main areas [1]:

- revitalization of weakened and rejuvenation of old plants by stimulating shoot formation and root system development;
- restoring damaged plants after stress (planting, transplanting, storage, long-term transportation, suboptimal lighting and temperature, pesticide treatment, soil salinity, etc.);
- stimulation of early and abundant flowering, intense coloring of leaves and flowers by enhancing the synthesis of chlorophyll and other pigments;
- induction of increased resistance to phytopathogens (especially root rot), pests, and unfavorable growing conditions;
- stimulation of active growth of vegetative mass;
- activation of the enzymatic and hormonal systems of plants, etc.

When using growth regulators, it is necessary to take into account that each of them is designed to stimulate the growth, development, and productivity of certain crops at appropriate doses, times, and methods of application [1, 2].

Natural growth regulators and their application. Natural phytohormones vary in chemical structure and effects. The first natural hormone was discovered by Charles Darwin while studying phototropism. Studying the effect of light on plant growth in his book “The Power of Movement in Plants,” he noticed that when a seedling is freely placed on a windowsill, a signal is transmitted from the upper part of the plant to the lower part, causing the latter to turn toward the light. He concluded that only the top of the seedling perceives the direction of light and transmits information to neighboring parts of the plant. Further research established the chemical nature and physiological effects of the substance that actually has this effect on the plant. The discovered

hormone was named “auxin” and was identified as indoleacetic acid (IAA). This phytohormone stimulates cell growth in the elongation zone, leading to an increase in shoots. At the molecular level, it affects the processes of cell differentiation, respiration, photosynthesis, and the activity of the protein synthesis apparatus [3].

Auxins are constantly produced in various parts of young plants. They are found in large quantities in seeds and fruits. The amount of auxins changes throughout the life of plants. Their content peaks when the plant enters the budding or flowering phase, and conversely, their amount decreases when growth stops [3].

The largest group of phytohormones is gibberellins. In Japan, there is a widespread rice disease that locals call “bakanoe” – “mad rice” or “bad sprouts.” Seedlings of diseased plants outgrow healthy rice, but the ears grow deformed and without grain. In 1926, Japanese botanist E. Kurosawa isolated and described the causative agent of the disease, the fungus *Gibberella fujikuroi* (now transferred to the genus *Fusarium*). It soon became clear that many of the symptoms of “mad rice” could be induced by the culture fluid in which the fungus grew. This means that the fungus secretes a water-soluble substance that enhances rice growth. The substance was named gibberellin after the genus name of the fungus [1, 3].

Throughout the plant's life cycle, the set of gibberellins can change, and they all have different meanings for its development. Their action is similar to that of auxins, i.e., they cause stem elongation due to cell stretching. However, gibberellins are capable of enhancing not only stem growth but also changing the shape and number of leaves. The use of gibberellins in plant treatment helps them accumulate green mass and dry matter. A significant amount of gibberellins is produced in leaves and seeds [3].

The first cytokinin was discovered by Skog and Miller in 1955. In terms of its chemical structure, the isolated substance was similar to adenine and was named “kinetin.” Subsequently, its chemical analogues were grouped under the general name cytokinins [3]. As a result of treating plants with cytokinins, the dormant phase is interrupted and the plants begin to sprout with greater vigor. Numerous experiments

have demonstrated the ability of cytokinins to activate cell division and increase the number of mitoses [2].

Treatment with cytokinins leads to an increase in germination energy, seed germination, dry weight accumulation by seedlings, and termination of the dormancy phase of dormant buds in woody plants. A special effect is the stimulation of lateral shoot growth, the influence on the formation and development of generative organs, which causes plants to flower in unfavorable conditions. Cytokinins have a valuable property—they slow down the aging process in plants. They are able to attract nutrients to the spent organ. A high content of cytokinins can be observed in unripe fruits and developing seeds, as they are strongly associated with embryo development. They have also been found in shoots, and researchers often believed that they were also present in the roots [3].

Absciscic acid (ABA), a natural phytohormone of terpenoid nature, has a wide range of effects. Its use can cause both inhibition and enhancement of processes in plants. Therefore, ABA can be considered an antagonist of substances that stimulate life processes in plants [3].

Absciscic acid slows down all growth processes, which is associated with the inhibition of nucleic acid production. ABA affects the photosynthetic function of plants, reducing chlorophyll content and photosynthetic activity. Absciscic acid is produced in cells in response to drying and cooling. In these conditions, water deficiency is observed, which is why this hormone is called the stress hormone. An important property of ABA is to ensure the winter dormancy of buds and seeds [3].

Ethylene is a regulator that, like ABA, inhibits plant growth and development processes and is capable of activating the aging process of cells, tissues, and organs. Thus, it accelerates the processes of wilting, flower fall, and the formation of the color characteristic of ripe fruits. In plants, ethylene can be produced in response to extreme temperatures, poor water supply, and mechanical trauma. Due to this property, the hormone has become very important in plant damage, which is why it is called the mechanical stress hormone [3].

In addition to the phytohormones listed above, there are endogenous substances known to have similar effects to phytohormones. Among them are polysaccharide compounds with growth-regulating properties. These substances participate in glycobiological interactions and can influence intracellular signaling processes. These include carbohydrate-binding proteins such as lectin and antibodies against carbohydrate determinants, membrane-bound glycoconjugates such as glycoproteins, glycolipids, oligo- and polysaccharides [3].

Synthetic growth regulators and their application. Synthetic growth regulators began to appear after the synthesis of auxin (indoleacetic acid) by Dutch plant physiologist F. Kegel (1931-1935). Subsequently, similar compounds with high biological activity were synthesized. The most promising growth stimulants were indolebutyric acid, naphthylacetic acid (NPA), and 2,4-dichlorophenylacetic acid (2,4-D). In 1955, kinetin (cytokinin) was synthesized [4].

Synthetic regulators also include plant growth inhibitors: retardants—preparations that reduce the length and increase the thickness of stems, and morphactins—compounds that cause abnormalities at the growth point and the appearance of distorted organs in plants. They also include substances that specifically inhibit the movement of IAA and its derivatives throughout the plant. Substances with a sharply inhibitory effect include herbicides that destroy weeds [4].

Unlike natural inhibitors, synthetic inhibitors are capable of suppressing growth processes more sharply. They are not subject to inactivation by plant tissues for a long period of time. Their action is often associated not only with growth, but also with the disruption of morphogenetic processes [5].

The use of plant growth regulators in practice allows for changes in metabolism identical to those that occur under the influence of certain external conditions (daylight hours, temperature, etc.), for example, to accelerate the formation of generative organs, enhance or inhibit growth, etc. To enhance the growth and organogenesis of cultivated plants, stimulants such as auxins and gibberellins are used, and to inhibit growth, synthetic growth inhibitors are used, including defoliants, which cause leaf fall, and desiccants, which dry out organs or entire plants [4].

Synthetic auxin-type stimulants (β -indoleacetic acid, or heteroauxin, β -indolebutyric acid, α -naphthylacetic acid) are used to enhance root formation in cuttings of woody and herbaceous plants, improve tissue fusion during grafting, and prevent fruit drop in fruit trees and berry bushes. These substances are used in various concentrations (from 20 to 1000 mg/l) depending on the method of application to the plant [4].

Gibberellins are used to enhance the growth of seedless grape varieties, bring potato tubers out of dormancy, enhance the growth of hemp and flax stems, and accelerate tomato fruiting [4].

Synthetic growth inhibitors are used to delay the sprouting of potato tubers during storage and to inhibit the growth of cereal stems to increase resistance to lodging. The mechanism of the inhibitory effect of synthetic inhibitors on plants has not been sufficiently studied. It has been established that most of them inhibit growth by separating the processes of phosphorylation and respiration and suppressing the synthesis of nucleic acids [4].

Among the growth regulators used in agricultural production, a major role belongs to preparations with a complex effect, which in some cases exceed the effectiveness of natural hormones or their synthetic analogues, which determines the timing of treatment (phases of crop development) and application rates. Thus, preparations based on triterpenic acids, used for seed treatment, exhibit the properties of auxins to a greater extent, and in the flowering phase (the beginning of fruit formation) – gibberellins. Ambiole works in a similar way – when treating seeds, it exhibits the properties of cytokinins, and subsequently – auxins. In some cases, the different properties of the preparation work simultaneously, ensuring its maximum effect [1].

Compounds of the 1,3,5-triazine series are characterized by a wide range of useful properties for practical use. They have found application in medicine, pharmacology, microbiology, agriculture, and the photo and textile industries. Today, 1,3,5-triazine derivatives are most widely used as herbicides (atrazine, simazine, propazine, promethrin) and in the production of resins (allyltriazine, vinyltriazine, and

melamine-formaldehyde resins) [6,7]. 1,3,5-triazines are also known as fungicides, medicines, bleaches, disinfectants, stabilizers for lubricants, oils, and polymer materials. They are used in the production of dyes, explosives, and as condensation reagents in peptide synthesis [7]. The 1,3,5-triazine cycle is part of the structure of compounds that have anticancer, antiviral, antimicrobial, cardioprotective, anti-inflammatory, antituberculosis, antimalarial, antioxidant, and other types of activity [8]. Among the herbicides derived from triazine, there are broad-spectrum preparations capable of destroying many types of weeds, as well as preparations with narrow selectivity. They are characterized by both systemic and contact action [9].

All triazine herbicides are low-toxic to warm-blooded animals and humans. They penetrate plants better through the root system and reach the leaves with transpiration flow. Therefore, most of them are soil-acting herbicides. Only Semeron and certain formulations of Atrazine (Mayazin, Zeapos) are used against vegetative weeds [10].

The herbicidal activity of sim-triazines is directed against annual monocotyledonous and dicotyledonous weed species during their germination, but they are not sufficiently effective against rooted and perennial species. Triazines, for example, actively suppress Canadian thistle, burdock, white pigweed, wild radish, field mustard, chickweed, black nightshade, ragweed, broomweed, romen, chicken millet, galinsoga, and oatgrass [10, 11].

In the production of growth-stimulating preparations, an important task is to increase the solubility of active compounds in water. The solution to this problem may be the use of surfactants (SAs), which will act as emulsifiers, solubilizers, and stabilizers of the preparation.

Recently, surfactants of biogenic origin, or biosurfactants, have attracted particular interest. They are as effective as synthetic surfactants and, at the same time, are environmentally safe. Due to their physicochemical properties and biological activity, biogenic surfactants can enhance the effectiveness of growth-stimulating compounds [12].

Synthesized thiosulfonates derived from sim-triazine are promising for the creation of new plant growth stimulants, but their use is complicated by low solubility in water.

This problem can be solved by using surfactants that increase the solubility of thiosulfonates. This will also reduce the minimum amount of active ingredient required for effective application, which is important from an environmental and economic point of view.

To obtain a composition with growth-stimulating activity, we chose the rhamnolipid biocomplex *Bacillus* spp. as a surfactant. This type of biogenic surfactant has a number of important properties, among which the following are worth highlighting: surface and emulsifying activity, wetting of surfaces, and influence on the permeability of cell membranes. These properties allow biogenic surfactants to be used to create complex preparations with various biologically active substances, including poorly soluble thiosulfate esters [13-15].

Biogenic surfactants have certain advantages over synthetic ones—they are low-toxic and biodegradable, which determines their use in environmentally safe technologies. In our case, another important aspect is that the selected rhamnolipid surfactants are capable of affecting the permeability of plant cell membranes, which contributes to improved absorption of water and nutrients from the growing medium [16].

The composite preparations were developed based on synthesized 2,4-dichloro-6-(4'-aminobenzenesulfonylthiomethyl)-sym-triazine (MTS derivative of sym-triazine) or 2,4-dichloro-6-(4'-aminobenzenesulfonylthioethyl)-sym-triazine (ETS derivative of sim-triazine) and laboratory samples of rhamnolipid biocomplex concentrate (RBC). During the research, a number of water-alcohol complex preparations with different ratios of active compounds were obtained.

The main task in the development of complex preparations was to establish the optimal ratio of thiosulfoesters and bio-PAPs to create stable forms of preparations while maintaining their maximum effectiveness as plant growth regulators.

To study the obtained complex preparations, the UV spectra of freshly prepared solutions of thiosulfate esters, RBC, and their compositions were analyzed. The results of the research are shown in Figs. 1-3.

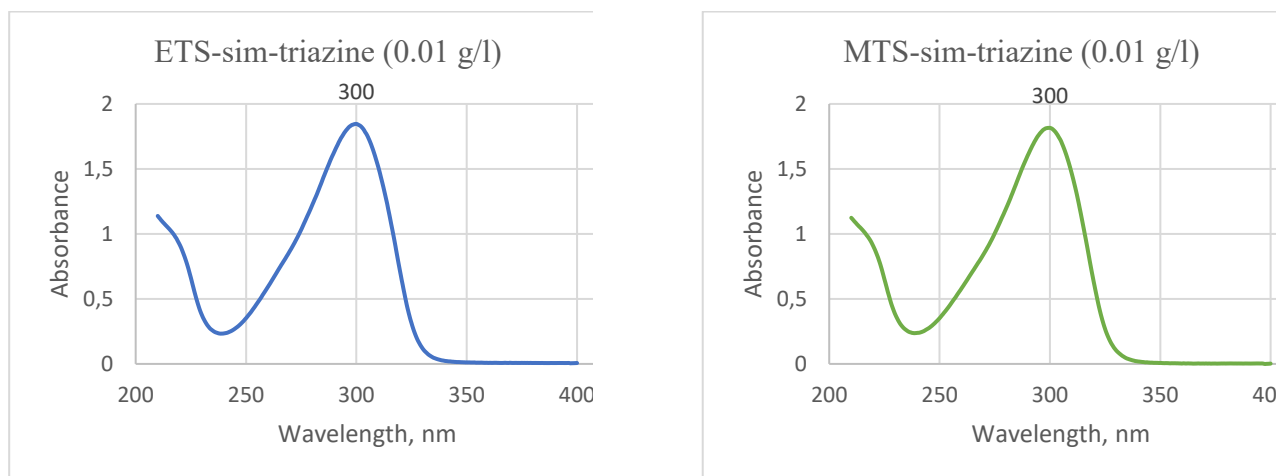


Figure 1. UV spectra of freshly prepared solutions of ETS-sym-triazine and MTS-sym-triazine with concentrations of 0.01 g/L.

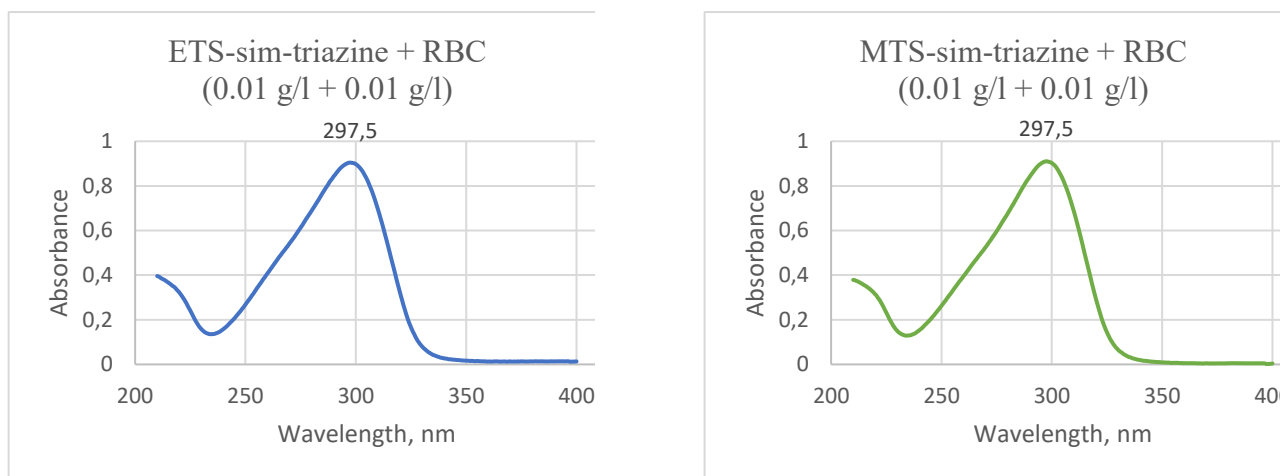


Figure 2. UV spectra of freshly prepared complex preparations of ETS-sym-triazine + RBC and MTS-sym-triazine + RBC with concentrations of 0.01 g/l + 0.01 g/l.

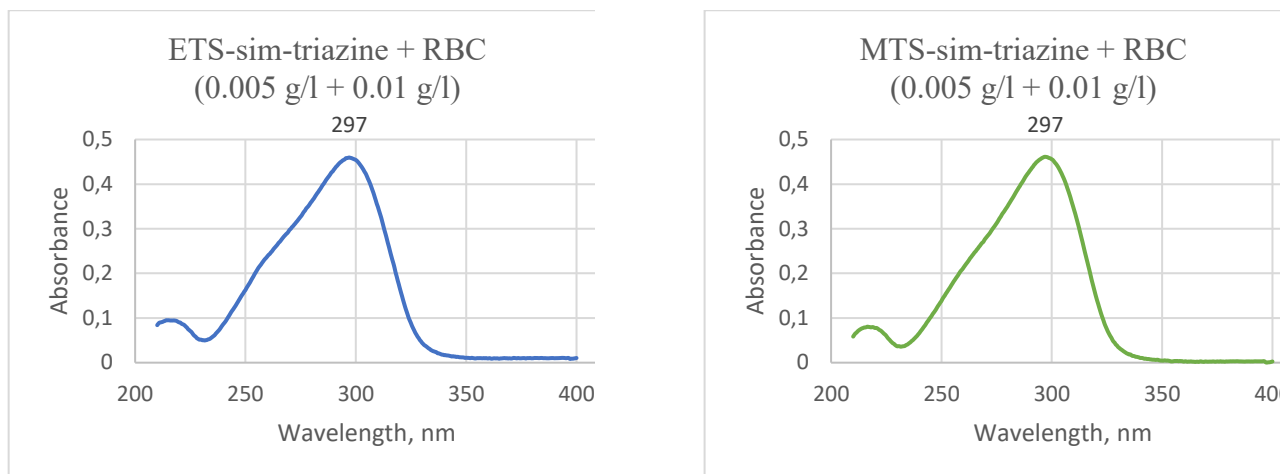


Figure 3. UV spectra of freshly prepared complex preparations of ETS-sym-triazine + RBC and MTS-sym-triazine + RBC with concentrations of 0.005 g/l + 0.01 g/l.

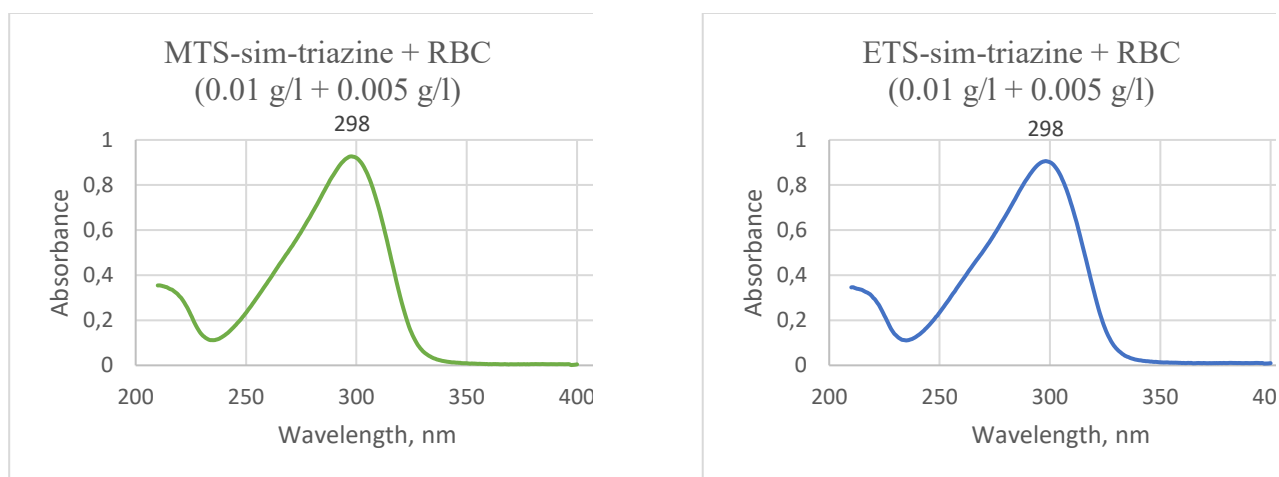


Figure 4. UV spectra of freshly prepared complex preparations of ETS-sym-triazine + RBC and MTS-sym-triazine + RBC with concentrations of 0.01 g/l + 0.005 g/l.

From the spectra obtained, it can be concluded that for individual substances, ETS-sym-triazine and MTS-sym-triazine, the absorption spectra in 96% ethanol are characterized by a single absorption band with a maximum at 300 nm.

The individual spectrum of RBC in both water and 96% ethanol does not contain peaks in the studied UV region.

No new peaks are observed in the spectra of the complex preparations ETS-sym-triazine + RBC and ETS-sym-triazine + RBC of all combinations. However, the absorption maximum is slightly shifted compared to the absorption bands characteristic of individual compounds and is $\lambda = 297\text{-}298$ nm. At the same time, the maxima of the spectra of the complex preparations ETS-sym-triazine + RBC coincide with the

maxima of the spectra of the complex preparations MTS-sym-triazine + RBC with identical concentrations of active substances.

The data obtained indicate that in freshly prepared complex preparations, there is an interaction between thiosulfonates and RBCs with the formation of new complex compounds.

In order to find new plant growth regulators that are competitive with existing commercial preparations, the growth-regulating activity of synthesized thiosulfonates derived from sim-triazine and their complex preparations with a rhamnolipid biocomplex was studied using a standard method. A variant of the experiment without treatment with preparations was used as a control. The experiments were repeated three times, and statistical data processing was performed according to Sokolov A.V., with the deviation of the arithmetic mean not exceeding +1.5%.

Watercress and oat seeds were selected as test objects. The results of the study are presented in Tables 1 and 2.

Table 1.

Screening of S-esters of thiosulfonic acids derived from sim-triazine, RBC, and their compositions for growth-regulating activity in relation to watercress

№	Preparation	Test culture (watercress)	
		Similarity, %	Linear root length indicators, % relative to control
			Root
1	RBC (0.01 g/l)	102	104
2	MTS-sym-triazine (0.01 g/l)	98	112
3	MTS-sym-triazine + RBC (0.01 g/l + 0.01 g/l)	108	117
4	MTS-sym-triazine + RBC (0.005 g/l + 0.01 g/l)	104	112
5	MTS-sym-triazine + RBC (0.01 g/l + 0.005 g/l)	98	110
6	ETS-sym-triazine (0.01 g/l)	94	123
7	ETS-sym-triazine + RBC (0.01 g/l + 0.01 g/l)	100	131
8	ETS-sym-triazine + RBC (0.005 g/l + 0.01 g/l)	93	123
9	ETS-sym-triazine + RBC (0.01 g/l + 0.005 g/l)	93	125
10	Terpal (Rist inhibitory Drug) (0.01 g/l)	102	67
11	Ivin (growth stimulant) (0.01 g/l)	95	117

The results of the studies show that the thiosulfonates and RBCs studied, when used independently at concentrations of 0.01 g/l, do not increase the germination of watercress seeds. Among the studied combined preparations, only MTS-sym-triazine + RBC preparations at concentrations of 0.01 g/l + 0.01 g/l and 0.005 g/l + 0.01 g/l are capable of slightly improving germination – by 8 and 4 %, respectively.

All studied compounds and their complex preparations showed the ability to stimulate the growth of watercress roots. ETS-sym-triazine and its complex preparations showed higher stimulating properties than MTS-sym-triazine and complexes based on it. The ETS-sym-triazine + RBC complex in a concentration of 0.01 g/l + 0.01 g/l performed best – it activates watercress root growth by 31%. Among the MTS-sym-triazine + RBC complexes, the preparation with a concentration of 0.01 g/l + 0.01 g/l showed the greatest stimulating properties – it stimulates root growth by 17%.

Table 2.

Screening of S-esters of thiosulfonic acids derived from sim-triazine, RBC, and their compositions for growth-regulating activity in relation to oats

№	Preparation	Test culture (oats)		
		Similarity, %	Linear indices of plant part length, % relative to control	
			Root	Stem
1	RBC (0.01 g/l)	105	113	110
2	MTS-sym-triazine (0.01 g/l)	107	112	114
3	MTS-sym-triazine + RBC (0.01 g/l + 0.01 g/l)	110	126	125
4	MTS-sym-triazine + RBC (0.005 g/l + 0.01 g/l)	112	118	121
5	MTS-sym-triazine + RBC (0.01 g/l + 0.005 g/l)	105	121	120
6	ETS-sym-triazine (0.01 g/l)	110	124	128
7	ETS-sym-triazine + RBC (0.01 g/l + 0.01 g/l)	121	150	157
8	ETS-sym-triazine + RBC (0.005 g/l + 0.01 g/l)	117	134	137
9	ETS-sym-triazine + RBC (0.01 g/l + 0.005 g/l)	119	129	131
10	Terpal (Rist inhibitory Drug) (0.01 g/l)	105	78	98
11	Ivin (growth stimulant) (0.01 g/l)	104	121	111

It has been established that all the compounds studied and their complex preparations increase the germination of oat seeds. Complex preparations of ETS-sym-triazine with RBC proved to be better than ETS-sym-triazine when used alone and better than preparations based on MTS-sym-triazine. The ETS-sym-triazine + RBC complex at a concentration of 0.01 g/l + 0.01 g/l showed the highest stimulating ability, namely, it increased the germination of oat seeds by 21% compared to the control.

The studied RBCs, thiosulfoesters, and their complex preparations showed growth-stimulating activity in relation to the root and stem of oats. The complex preparations of both thiosulfonates with RBC showed a higher growth-stimulating effect than ETS-sym-triazine, MTS-sym-triazine, and RBC when used independently at concentrations of 0.01 g/l. ETS-sym-triazine at a concentration of 0.01 g/l stimulates both root and stem growth of oats more effectively than MTS-sym-triazine at the same concentration. The same pattern can be observed for all complex preparations – complex preparations based on ETS-sym-triazine stimulate the growth of oat roots and stems better than MTS-sym-triazine preparations. It has been established that ETS-sym-triazine and its complex preparations stimulate stem growth slightly better than root growth in oats. The best results were demonstrated by the complex preparation ETS-sym-triazine + RBC at a concentration of 0.01 g/l + 0.01 g/l – it stimulates the growth of oat roots by 50% and stems by 57%.

Among all the studied preparations, the highest growth-stimulating activity against watercress and oats was shown by the complex preparation ETC-sym-triazine + RBC at a concentration of 0.01 g/l + 0.01 g/l. This preparation also has the best effect on germination for oat seeds. Watercress germination indicators increased under the action of the complex preparation MTC-sym-triazine + RBC at a concentration of 0.01 g/l + 0.01 g/l.

As a result of the study, it can be stated that compositions based on synthesized thiosulfonates and rhamnolipid biocomplex of *Bacillus* spp. and their compositions are effective growth regulators for plants. Based on the UV spectra of solutions of thiosulfonates, rhamnolipid biocomplex and their compositions, the stability of complex preparations over time was investigated.

SECTION 2. ARCHITECTURE, CONSTRUCTION

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.2.1

2.1 Digital technologies in urban construction and spatial planning: integration of bim and visualization tools (Revit, 3DS Max, Autocad)

Chapter 1. Conceptual Foundations of Digital Transformation of Urban Planning

Introduction

Modern urbanism and the practice of urban planning are on the threshold of a fundamental transformation dictated by both internal limitations of established methodologies and external challenges of unprecedented scale. Cities, being the most complex socio-economic and technical systems, face a set of problems that require a radical revision of approaches to their planning, development and management. Traditional methods, which have served as the basis for shaping urban spaces for decades, are increasingly demonstrating their inability to respond adequately and quickly to dynamically changing conditions. In this context, digitalization is no longer just a technological trend, but a strategic imperative that opens new horizons for creating more efficient, sustainable and livable urban ecosystems.

Historically established urban planning paradigms, despite their undeniable importance in the past, exhibit a number of significant limitations in the realities of the 21st century. One of the key and most acute problems is the aggravating gap between the growing scarcity of resources (financial, natural, energy) and simultaneously increasing demands of society to the quality of urban environment. This fundamental contradiction is aggravated by the low efficiency of conventional strategies of resource allocation and environmental management, which often fail to adapt to rapid socio-economic and environmental changes. Plans that take years to develop and negotiate can become obsolete before they are even implemented, leading to suboptimal decisions and waste of limited resources.

Large-scale and heterogeneous migration flows are another major challenge to the effectiveness of traditional approaches. The influx of people with different cultural

codes, social status and economic opportunities into cities creates a significant and often unpredictable load on the entire urban infrastructure - from transportation and engineering to social and recreational. This, in turn, affects the social cohesion of urban communities, forming new centers of tension . Traditional planning, characterized by relatively static master plans and long, bureaucratized procedures of coordination, has great difficulty coping with the need for flexible and rapid adaptation to such dynamic demographic shifts.

The fundamental mismatch between the inherently static nature of traditional planning and the highly dynamic nature of urban systems is also manifested in the problem of fragmentation of project implementation processes. This problem, historically inherent in the construction industry, is extrapolated to urban development projects, significantly undermining their overall effectiveness . The life cycle of an urban project, from pre-project analysis to construction and subsequent operation, is divided between many independent participants: authorities, designers of various specializations, construction organizations, and operating services. Each of them works in its own logic, uses its own tools and data formats, which inevitably leads to the emergence of isolated information arrays (so-called data silos), disruption of communication links and, as a result, loss of data and time at the junctions between stages and participants. The lack of unified, integrated control and end-to-end information management exacerbates the complexity of managing complex urban systems and leads to numerous errors, collisions and inconsistencies, the cost of correcting which increases avalanche-like as the project progresses.

Thus, in-depth analysis reveals a key problem: traditional methods based on periodic updates of master plans and zoning regulations are too slow, inflexible and reactive in the face of rapid socio-economic changes, demographic shifts and evolving environmental requirements . Urban issues, whether resource scarcity or migrant integration, are not isolated issues; they are closely intertwined with housing, transportation, employment, and social service policies. Traditional approaches, often compartmentalized along sectoral (departmental) lines, struggle to adequately model

and manage these complex interdependencies, leading to suboptimal or even counterproductive outcomes.

It is in response to these challenges that digitalization becomes not just an opportunity, but a critical factor in the development of cities and regions, offering tools to optimize processes and fundamentally rethink traditional approaches to management . The paradigm shift towards digital, model-oriented methods promises significant and, importantly, measurable improvements in urban management. The projected benefits of implementing an integrated digital infrastructure are substantial. According to expert estimates, it is expected to reduce operating costs by 30%, shorten the time required to handle citizen requests by 70%, and increase emergency preparedness by 90% . These indicators clearly demonstrate the potential for increasing operational efficiency and improving the quality of municipal services, achieved through digital transformation.

The central place in this process is occupied by 3D modeling technologies. 3D modeling of cities is defined as one of the most important and most promising directions in the digitalization of urban planning . Visual and data-rich approach allows not only to perceive urban spaces more intuitively, but also to conduct complex multifactor analysis, which is inaccessible when working with two-dimensional plans. Moving from paper-based or fragmented electronic workflows to automated digital workflows ensures seamless data transfer between participants and minimizes human error. Creating a single, trusted and always up-to-date source of information (Single Source of Truth) is crucial to eliminate data loss, improve the efficiency of decision-making processes and overcome the aforementioned fragmentation problem .

In a broader strategic context, digitalization is aimed at improving the quality of life of the urban population, better environmental protection, law enforcement, optimization of logistic flows and many other municipal development objectives . The strategic use of such technologies as remote sensing data (RS), Big Data analytics (Big Data) and the Internet of Things (IoT) contributes to the creation of improved urban infrastructure management systems, enhances public safety, improves transportation accessibility and, which is especially important in the context of global climate change, helps to reduce the negative anthropogenic impact of cities on the environment .

In this technology stack, building information modeling (BIM) and its logical development - urban information modeling (CIM) play a special role. These technologies contribute to facilitating the flow and exchange of information, increasing transparency in decision-making processes and, importantly, enhancing opportunities for public participation in urban regeneration and planning processes . By providing visual and understandable models of future change, digital tools enable a more informed and constructive dialog with residents, shifting from a top-down planning paradigm to models of co-creating urban environments. This shift from reactive solutions to problems that have already occurred to proactive and even predictive management is a key characteristic of digital transformation.

Thus, the digitalization of urban planning is not an end in itself, but a powerful tool to move from fragmented and reactive management to a holistic, proactive and data-driven approach, which is the only one possible for successful urban development in the 21st century.

Conceptualization: from BIM to urban digital twins

For the effective use of digital technologies in urban construction and spatial planning it is necessary to form a clear and unambiguous conceptual apparatus. Understanding the essence, functionality and interrelationships of key concepts such as Building Information Modeling (BIM) and City Information Modeling (CIM) is a prerequisite for building effective workflows and developing digital transformation strategies. This section sequentially discusses the evolution of information modeling from the level of an individual object to a comprehensive digital twin of a city.

Building Information Modeling (BIM) as the foundation of digital construction

At the heart of the modern digital transformation of the construction industry lies the technology of building information modeling, or BIM (Building Information Modeling). Despite the fact that the term has entered the professional lexicon, its interpretation is often reduced to the idea of three-dimensional geometry. However, the essence of BIM is much deeper and lies in the approach to information management throughout the life cycle of the object.

BIM is the process of creating and using coordinated, consistent and model-based information about a construction asset to make design decisions, produce high quality working documents, predict performance, produce estimates and construction plans, and then operate and manage the asset.

The key difference between BIM and traditional computer-aided design (CAD/CAD) is that a BIM model is not just a set of lines and surfaces, but a structured object-oriented database where each element (wall, window, beam, piping) is an "intelligent" object. It carries not only geometric parameters, but also a huge amount of attributive information: from physical properties of materials and data about the manufacturer to cost characteristics and planned dates of installation.

Formally, BIM can be defined as a digital representation of the physical and functional characteristics of an object . This technology has evolved into an innovative tool for improving the efficiency of building structures and optimizing processes by developing intelligent and sustainable structures . It is the information management aspect, not just 3D visualization, that makes BIM such a powerful tool.

One of the fundamental advantages of BIM is the coverage of the entire life cycle of construction projects. This approach overcomes the fragmentation problem mentioned earlier. The technology provides data continuity at all stages, from the initial creation and management of 3D models (3D BIM), through construction schedule management (4D BIM) and cost management (5D BIM), all the way to operations and maintenance management (6D BIM) . This integrated view allows the facility to be viewed not as a set of disparate phases, but as a single investment project, optimizing its performance throughout its life cycle.

At the planning and design stage, BIM provides a number of undeniable advantages:

1. Performance-Based Design. BIM enables decision-making based on objective data and analysis. Modeling tools provide an in-depth understanding of metrics such as natural light levels, potential energy consumption of the building, acoustic comfort, load-bearing structure performance, and airflow distribution. This allows architects and engineers to iteratively optimize design solutions to

meet specific sustainability goals such as waste minimization, energy efficiency, and renewable energy integration .

2.Improved interdisciplinary coordination. The BIM model serves as a single platform for architects, designers, mechanical, electrical, and plumbing (MEP) engineers, and others to work together. Working in a single, coordinated environment, teams can identify and resolve spatial and logical conflicts (e.g., duct intersection with a support beam) at the earliest possible stage. Automatic collision detection capabilities are particularly valuable for preventing costly changes and rework already on the construction site, which is especially important for complex engineering systems .

3.Increased accuracy and efficiency. By automating many routine processes, BIM helps with proper task sequencing, logistical planning, risk identification, and error reduction. Accurate automated calculations of scope of work (bill of quantities) and materials directly from the model are a key advantage for accurate project cost estimation .

It is important to emphasize that the scope of BIM is not limited only to buildings. The technology is increasingly used in infrastructure construction, becoming a common language for the design of buildings and infrastructure facilities around the world . For infrastructure projects such as bridges, roads, tunnels and utilities, BIM offers similar benefits: reduced documentation time, reusability of design solutions (reproducibility), reduced exposure to errors and the ability to accurately estimate the cost and duration of the project . BIM helps to create a centralized digital environment that integrates all project data, which helps to meet given deadlines and budgets .

Finally, a critical aspect of BIM is its role as an information platform for storing and sharing asset data during the operational phase. As-Built BIM models can contain detailed information from equipment manufacturers, specifications, maintenance schedules and other data necessary for effective Facility Management. This greatly simplifies the process of transferring the object from the construction stage to operation and provides the owner of the building or infrastructure with all the full information for making management decisions .

Thus, BIM is not just a technology, but a methodology that changes the very fundamentals of design, construction and operation. By providing detailed, structured and coordinated information about objects, BIM lays the very digital foundation on which more complex management systems are built, scalable to the level of entire urban areas and cities.

Urban BIM: Scaling BIM for Complex Urban Environments

As the complexity of urban planning tasks increases and the focus shifts from individual buildings to complex land development, there is a need to scale BIM methodology. While classical BIM is excellent at detailing a specific object, its capabilities are no longer sufficient for planning at the level of a neighborhood, district or large infrastructure node. This niche is occupied by the concept of Urban BIM, or urban information modeling, which should be considered as a logical intermediate stage on the way from BIM to a full-fledged digital twin of the city (CIM/DTC).

The term "Urban BIM" does not always have a strict, generally accepted academic definition, but its essence is the application and integration of BIM principles and methodologies at a scale larger than an individual building, encompassing neighborhoods, infrastructure networks or significant sections of the urban fabric. A key feature of this approach is the synthesis of detailed data from BIM models with the macro-level geospatial context provided by Geographic Information Systems (GIS) .

The main objective of Urban BIM is to bridge the conceptual and technological gap between the micro and macro scales. On the one hand, BIM traditionally focuses on micro-level details of buildings and structures, providing the richest semantic information about their internal structure, materials and engineering systems. However, standard BIM tools often lack a broad geospatial vision and the ability to perform complex spatial analysis at the city scale. On the other hand, GIS excel at describing macro-level geographic scenes, analyzing spatial data (zoning, ecology, demography), but historically they have lacked the detail to describe the internal structure of buildings.

Thus, Urban BIM seeks to combine micro-level building interior detailing with macro-level geographic scenes, integrating building geometry, its semantic

information, and a variety of geographic information resources to create larger and more accurate 3D models of the urban environment . This is not just an overlay of one model on another, but a deep data integration that enables a qualitatively new kind of analysis. For example, to assess the cumulative impact of several designed buildings on the insolation of adjacent areas, to analyze the transport accessibility of a new residential area taking into account the existing road network, or to model the visual perception of a new development in the existing urban landscape.

The key technological challenge on this path is to ensure effective data fusion between BIM and GIS, overcoming such problems as data loss and semantic mismatch during their conversion . To solve this problem, specialized data architectures and exchange standards are being developed, such as mapping formats IFC (Industry Core Classes - BIM standard) and CityGML (3D virtual city modeling language - GIS standard).

Urban BIM can be seen as a "meso-level" technology, critical to solving many practical urban planning problems that are too large for a single BIM model, but require more detail than a high-level citywide model can provide. These are planning of new development areas, projects of complex reconstruction of existing neighborhoods, design of transport and interchange hubs and linear infrastructure corridors. Successful implementation of Urban BIM depends not only on technological standards, but also on building joint workflows and data exchange agreements between different participants: developers, municipal services, transportation agencies and design organizations. Without this, the problem of fragmentation that BIM solves at the project level risks replicating itself at a higher, urban level.

Urban Information Modeling (CIM) and the Digital Twin City (DTC): towards integrated urban management

The pinnacle of the evolution of digital approaches in urban management today is the concept of City Information Modeling (CIM), the practical implementation of which is the creation of the Digital Twin City (DTC - Digital Twin City). This approach represents a significant qualitative leap compared not only to traditional design, but

also to BIM or Urban BIM, marking a paradigm shift from design and construction to integrated, dynamic life cycle management of the entire city.

CIM is an advanced urban management paradigm that integrates geographic information systems (GIS), building information modeling (BIM), and the Internet of Things (IoT) to create a multi-dimensional digital framework for comprehensive urban data management and intelligent decision making . While BIM is primarily an *object* model, CIM is a *city* information model covering data on buildings, surface and underground infrastructure, as well as geological, environmental and social information .

The ultimate goal and the most complete realization of CIM is to create a dynamic digital twin of the city - a virtual replica that does not just statically represent the physical environment, but lives and changes with it. The key difference between DTC and earlier 3D models is its connection to the real world through real-time data streams, which provides support for 3D visualization, interactive interaction, and predictive analytics .

The scientific and technological foundation of CIM/DTC is built on the synergistic fusion of three key components:

- BIM provides detailed, semantically rich information about individual assets - the "building bricks" of a city.
- GIS offers geospatial context, provides integration of heterogeneous territorial data and provides powerful tools for spatial analysis.
- The Internet of Things (IoT) acts as the "nervous system" of the city, delivering continuous streams of real-time data from millions of sensors deployed throughout the city (transportation sensors, air quality sensors, energy meters, cameras, etc.).

It is the integration of data from the IoT that turns a static model into a living "twin". CIM/DTC is often seen as a logical extension and evolution of BIM and GIS technologies, scaling them to the city level and enriching them with operational data .

The key capabilities and applications of CIM/DTC are extremely broad:

- 1.Integrated Urban Management. CIM is designed for efficient city

management and evidence-based decision support. The platform enables sophisticated analysis such as assessing the potential for rooftop solar development, noise pollution mapping, traffic flow modeling, or analyzing the provision of social infrastructure facilities .

2.Smart City (Smart City) development. CIM/DTC is an indispensable digital core for the realization of the concept of "smart city", uniting on one platform data and services from different sectors of urban economy .

3.Urban renewal and planning. The technology finds practical application in urban regeneration projects. A vivid example is the project of modernization of Ilyinskaya Sloboda in Nizhny Novgorod (Russia). As part of this project, a comprehensive 3D digital model of the area was created, including existing and planned development, cultural heritage objects, surface and underground utilities, and landscape elements. The model, created using tools such as Autodesk InfraWorks, Revit and Civil 3D, served not only for design work, but also for investor engagement and dialog with the public, demonstrating the potential of CIM for strategic urban development .

4.Emergency Management. By integrating weather, infrastructure and population movement data, digital twins allow to model and predict the development of emergencies, such as floods or man-made accidents, and optimize response plans.

The move to CIM marks a fundamental shift from a "design-centric" view of the city (focused on the design and construction of discrete objects) to a "systems-centric" and "operations-centric" approach. The dynamic interactions between urban subsystems and the continuous life-cycle management of the city as a whole become the focus. However, building and maintaining such a complex system poses new challenges related to quality assurance and security of huge data sets, privacy issues, and the need for an unprecedented level of collaboration between different government agencies, private business, and academia.

Digital technologies as catalysts for sustainable urban development

The link between the adoption of advanced digital technologies such as BIM and CIM and the achievement of sustainable urban development goals is increasingly evident and is one of the key drivers of their diffusion. These tools have a unique potential to create more resilient, efficient, equitable and sustainable urban spaces, directly responding to the global sustainability agenda.

International frameworks such as the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) set the vector for urban development around the world. In this context, SDG 11: "Make cities and human settlements open, safe, resilient and sustainable" is of particular importance. Digital technologies, in particular BIM and CIM, are increasingly recognized as key tools for the practical implementation of the objectives of this goal .

The contribution of BIM to sustainable development is evident from the earliest stages of design. BIM methodology is initially focused on optimization and creation of sustainable and intelligent designs . This is achieved through detailed analysis and modeling that contribute to goals such as minimizing construction waste, increasing energy efficiency, improving water management systems, and integrating renewable energy . The ability to perform a life cycle analysis (LCA) of a building at the design stage, assess its carbon footprint, optimize the use of natural light and select the most sustainable materials provides designers with a powerful tool for creating green buildings. BIM offers transformational benefits such as detailed analysis of energy consumption, waste reduction through accurate material calculation, improved resource management and enhanced collaboration between project participants, all of which contribute to environmentally responsible construction .

The role of CIM in sustainable urbanism is even more far-reaching. CIM systems are purposefully designed for effective urban management and evidence-based decision support that promote sustainable urban development . They are often designed to comply with international green certification and sustainability assessment systems such as LEED or BREAM, which in turn are closely linked to SDG 11. The synergistic application of CIM and BIM technologies enhances the "digital brain of the city",

optimizing the planning and management of urban renewal and facilitating collaboration in data sharing among all stakeholders to achieve common sustainability goals . Information modeling in general serves as a fundamental platform for combining various digital technologies to address complex sustainability challenges , and the digitalization of the urban environment is seen as a critical means to improve environmental protection and use tools such as RS, big data, and IoT to reduce the negative impacts of urban activities .

Thus, while in its early days, digital tools in construction were mainly focused on improving efficiency and reducing costs, today there is a clear strategic shift. Sustainable development is no longer just a potential by-product of digitalization, but becomes one of the main drivers and the main goal of the development and application of BIM and CIM.

Specific contributions to different aspects of urban sustainability

The analytical potential inherent in BIM and CIM technologies enables a shift from general declarations of aspirations for sustainability to concrete, measurable actions in different areas of urban planning. The data-driven approach makes it possible to quantify and track sustainability indicators, set measurable targets and be held accountable for achieving them. This is a significant step forward from traditional, often qualitative or formal compliance-based approaches. Consider the specific contribution of digital technologies to key aspects of urban sustainability.

1. Efficient management and utilization of land resources

Land resources are one of the most valuable and limited assets of any city. BIM and CIM provide tools to utilize them more efficiently and effectively, especially in the context of urban renewal and development. Digital models support strategies for adaptive reuse and redevelopment of existing buildings and areas. Such strategies are often more cost-effective, faster to implement and less environmentally damaging than demolition and new construction, allowing cities to meet the need for new space in a more sustainable way .

Through informed planning and management using up-to-date CIM and BIM-based digital models, released or inefficiently used land resources (e.g., former

industrial areas due to deindustrialization) can be successfully revitalized. Such areas can be transformed into public spaces, parks, commercial or residential areas, which improves overall land use efficiency and stimulates the social and economic vitality of communities . In addition, CIM and BIM can support the development and implementation of innovative land use patterns such as mixed-use development, green roofs and rainwater harvesting systems, which improve the environmental performance of urban environments .

2. Sustainable housing and improved quality of life

Housing policies and practices supported by CIM and BIM technologies play a crucial role in improving the quality of life and well-being of residents . Digital tools help to mitigate the negative environmental impacts of housing construction and operation, such as excessive resource consumption and waste generation . BIM, as already mentioned, allows optimizing the use of materials and energy efficiency in building design .

At the urban planning level, CIM and BIM can increase the sustainability of the housing sector by optimizing the layout of residential areas, promoting the use of environmentally friendly materials, improving the overall energy efficiency of neighborhoods, and encouraging community participation in design processes . The digital twin technology generated from CIM and BIM can also model and optimize the management and recycling of demolition waste, improving resource efficiency in the construction sector and promoting a circular economy .

3. Sustainable and intelligent infrastructure development

Urban infrastructure planning and construction, supported by CIM and BIM, are key factors in promoting social justice and environmental sustainability . BIM is already widely used in infrastructure projects today to optimize resource utilization, improve workflows, reduce costly rework, and ensure that projects are delivered on time and on budget .

At the city level, CIM and BIM support green infrastructure planning (e.g., urban parks, public gardens, green corridors), which not only improves environmental conditions but also enhances the sustainability and cohesion of urban communities .

Integration with IoT technologies opens up even more opportunities. A CIM-based information platform can monitor the condition of urban infrastructure (roads, bridges, drainage systems) in real time using data from various sensors. This allows predicting potential structural problems and maintenance needs for timely preventive repairs, thereby improving the overall resilience and safety of urban infrastructure .

4. Preservation of cultural heritage and improved urban design

CIM and BIM provide powerful tools for preserving cultural heritage sites, which is of great importance for strengthening the cultural identity of residents and can contribute to tourism and economic prosperity . The use of laser scanning technologies (LIDAR) allows to create highly accurate BIM models of historical buildings, which serve as a basis for their careful restoration, condition monitoring and virtual representation. The project in Nizhny Novgorod, which included detailed modeling of historical architecture using Revit, is a clear example of this approach .

The integration of BIM with virtual (VR) and augmented (AR) reality technologies increases the efficiency and quality of the experience of cultural heritage preservation, and promotes the development of sustainable cultural-cognitive tourism . In the broader context of urban design, CIM and BIM enable planners to comprehensively assess the impact of urban regeneration projects on the overall urban fabric, optimize resource allocation, and ensure coordination with the city's long-term development strategy . Urban digital twin technology offers benefits such as automated collision detection in projects, rapid model updates, and integrated logistics, resulting in significant reductions in design errors .

5. Environmental performance, energy efficiency and climate change adaptation

BIM enables model-based environmental risk assessment, energy efficiency, life cycle environmental performance analysis, and climate change adaptation strategies for buildings . Simulation tools provide decision-making based on the analysis of parameters such as natural light, energy consumption and airflow, facilitating energy efficiency optimization and renewable energy integration .

At the city level, CIM, by integrating different data sources, can be used for city-wide environmental analysis, such as assessing the rooftop solar energy potential of an

entire city or mapping noise pollution zones . Digitalization in general contributes to environmental protection and optimization of logistic flows , while specific technologies such as remote sensing and IoT help in monitoring air and water quality and reducing the overall negative environmental impact . A platform built using CIM and BIM can assess the environmental impact of buildings, distinguishing between impacts from direct energy consumption and latent impacts related to the production and transportation of materials, leading to progress in reducing operational energy consumption and CO2 emissions.

The contributions to the different aspects of sustainability are not isolated. It is in the integration that the key advantage of digital platforms lies. For example, the design of sustainable housing (energy efficiency optimization using BIM) has a direct impact on overall urban energy consumption and environmental performance. CIM's ability to integrate data from these different domains allows planners to understand and manage these complex relationships, leading to more holistic and effective sustainability strategies. Land use decisions will have implications for infrastructure needs and housing provision, all of which can be modeled and evaluated in a single digital environment.

Conclusions of Chapter 1

The analysis of the scientific literature and practical trends presented in this chapter allows us to draw a number of fundamental conclusions that form the conceptual foundation for the further presentation.

First, the thesis that traditional approaches to urban planning and construction have reached the limits of their effectiveness and are unable to adequately respond to the complex challenges of modern cities is confirmed. The problems of data and process fragmentation, resource scarcity, high dynamics of social and economic changes require a transition to a new management paradigm based on integrated digital technologies.

Secondly, a clear hierarchical and evolutionary structure of digital tools is being formed. BIM acts as a fundamental layer, enabling the creation of detailed, semantically rich information about individual assets. Urban BIM scales this approach

to the neighborhood and complex level, integrating project data into a geospatial GIS context. At the top of this hierarchy is CIM / City Digital Twin, which combines BIM, GIS and data from the IoT to create comprehensive, dynamic models for city-wide operational management, analysis and forecasting.

Third, the direct and meaningful link between the implementation of information modeling and the achievement of sustainable development goals is undeniably proven. BIM and CIM provide concrete tools for improving environmental performance, energy efficiency, resource efficiency, creating better and safer living environments, developing sustainable infrastructure and preserving cultural heritage. This allows us to consider digitalization not as an end in itself, but as a key mechanism for the practical implementation of the principles laid down in the global sustainable development agenda, in particular in SDG 11.

Thus, the formation of a conceptual apparatus based on a clear understanding of the challenges of traditional planning, the benefits of digitalization and the potential of technologies such as BIM and CIM is a critical first step for developing effective strategies for digital transformation in urban construction and spatial planning. Subsequent chapters of the monograph will be devoted to a detailed analysis of specific software tools, the study of practical cases of their application, and the exploration of promising areas of development that will build on the theoretical foundation laid here.

Chapter 2. Digital Urban Planning Toolkit: A detailed analysis of software packages

Introduction

After reviewing the conceptual foundations of the digital transformation of urban planning, it is necessary to move on to a detailed analysis of the specific software tools that shape the technological landscape of contemporary design. Modern urban planning and construction is undergoing a fundamental transformation, moving away from traditional, often fragmented, methods based on two-dimensional documentation to integrated, data-rich three-dimensional digital environments. This shift is being driven by the increasing complexity of urban projects, the need for sustainability, and the

requirement for greater efficiency at all stages of the facilities lifecycle. Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information Systems (GIS) have become fundamental technologies in this transformation .

As it was shown in the previous chapter, traditional approaches to decision-making in urban planning, based on two-dimensional plans and static visualizations, no longer meet the actual needs and specifics of urban development. This emphasizes the urgent need to implement advanced 3D support systems and integrated digital workflows . This evolution represents not just a technological update, but a shift towards a more holistic and informed approach to shaping urban environments. The integration of BIM, which provides detailed modeling and information management of individual objects, and GIS, which provides spatial context and analysis tools for large areas, opens up new possibilities for a comprehensive understanding and management of urban systems . This technological symbiosis forms the basis for the creation of "digital twins" of cities - dynamic, data-driven replicas of urban systems that enable sophisticated analysis, predictive modeling, and optimized management of urban infrastructure .

However, the potential of individual, even the most powerful, software tools is only fully realized when they are used within the framework of coordinated, integrated workflows. Interoperability and seamless data sharing are critical factors to ensure effective collaboration between interdisciplinary teams involved in urban projects. There is a significant challenge to fully realizing this potential: despite the availability of advanced tools, much of the data generated during design and construction remains untapped. By some estimates, up to 95.5% of data in engineering and construction projects is underutilized, significantly reducing its potential to improve outcomes . This indicates a critical gap between technological capabilities and their practical application.

Thus, the pursuit of integrated digital workflows in urban planning is essentially a quest to transform data from a fragmented by-product to a central, actionable asset. Overcoming barriers to data management and utilization is key to successful digital implementation .

The purpose of this chapter is to explore in detail the functionality of the key software products developed by Autodesk - Revit, AutoCAD (including its vertical solutions Civil 3D and Map 3D) and 3ds Max. Their specific tools applicable to urban planning and construction tasks will be discussed and, most importantly, strategies for integrating them to create synergies. This analysis is intended to serve as a practical guide to implementing a digital approach, supported by technical details and scientific data.

Autodesk Revit: a BIM core for architectural and structural design

Autodesk Revit takes center stage in the digital design ecosystem as the primary tool for BIM authoring, that is, for creating information-rich models of buildings and structures. Its capabilities go far beyond simple 3D modeling, offering a comprehensive environment for interdisciplinary collaboration and data management over a significant portion of a facility's lifecycle.

Parametric Modeling and Intelligent Objects

Revit's key technological and conceptual advantage lies in parametric modeling. Unlike traditional CAD, where a drawing consists of independent geometric primitives (lines, arcs, polygons), the model in Revit consists of intelligent objects, or "families" (families). Each element - be it a wall, window, supporting column or duct segment - is not just a three-dimensional body, but an object with inherent data, rules of behavior and, most importantly, interrelationships with other objects .

A change in one parameter or element automatically entails a coordinated change in all related components and views. For example, moving a wall will automatically adjust its adjoining floors and roof and update its position on all plans, sections and facades. This principle, known as bidirectional associativity, ensures the integrity and consistency of the model at all stages of design, drastically reducing errors due to human error .

The ability to create custom parametric components ("families") allows to develop extensive libraries of standardized elements specific to urban planning tasks: from street furniture (benches, urns, lanterns) to complex facade systems or modular building elements. This significantly increases the efficiency of designing repetitive

objects and ensures stylistic and technical uniformity within large development projects .

Interdisciplinary collaboration and data centralization

Modern urban projects are inherently complex and require the close collaboration of a large number of specialists. Revit was originally created as a collaborative platform, allowing architects, structural, mechanical, electrical, and plumbing (MEP) engineers to work simultaneously on a common, centralized model .

Revit's worksharing mechanism allows the model to be divided into worksets, allowing each specialist or department to work on their part of the project while seeing related sections in context. The central model, stored on a local server or in the cloud, is synchronized with users' local copies, ensuring that up-to-date information is always shared.

This approach is vital for complex urban development projects. It allows at the earliest stages to automatically identify and eliminate interdisciplinary collisions, optimize the routing of engineering networks and make coordinated design decisions . Acting as the main BIM authoring tool, Revit serves as the "information core" of the project , creating non-geometric data-rich models that become a single source of truth for all participants.

Specificity of application for general planning and infrastructure modeling tasks

Although Revit is primarily a tool focused on building design (vertical construction), its capabilities are increasingly being used to solve problems related to general planning and modeling of urban infrastructure elements, especially at conceptual stages and in projects of integrated development of territories .

In Revit it is possible to create topo-surfaces that serve as a digital elevation model for the construction site. These surfaces can be built on the basis of imported topographic data from DWG files or on the basis of coordinate files with elevations . The availability of an accurate relief model allows to correctly "plant" buildings on the site, perform preliminary vertical layout and estimate the amount of earthwork.

For preliminary design within the framework of master plan development Revit can be used to create volumetric models of buildings (massing), which allows you to quickly assess the density of buildings, analyze the view characteristics and insolation. However, it is important to understand the limitations of the tool. Specialized tools, such as AutoCAD Civil 3D , are more suitable and powerful for detailed elaboration of relief, design of highways with complex turns and cross profiles, as well as for the design of external engineering networks.

When working with large-scale master plans in Revit, performance issues need to be considered. Models oversaturated with complex geometry and a large number of detailed elements can significantly slow down the program. For this reason, efficient operation requires the use of level of detail (LOD) management strategies, as well as the proper partitioning of the model into linked files. Elements such as power lines, long roads or large sanitary protection zones often require simplified representation or manual drawing in Revit . An effective technique is to pre-draw site boundaries and key contours in AutoCAD and then import or link the DWG file into Revit as a sub-base .

Despite these limitations, Revit proves useful for modeling individual infrastructure components as well. It can be used to create parametric models of small bridges, retaining walls, and landscaping elements. Built-in analysis tools allow to perform preliminary calculation of loads for structural elements, and the function of collision detection helps to avoid intersections, for example, utilities with the foundations of buildings or bridge structures .

Automated documentation and built-in analysis tools

One of the key advantages of the BIM approach implemented in Revit is the **automation of the process of obtaining working documentation**. Floor plans, facades, sections, assemblies, as well as bills of materials and statements of quantities are not drawn separately, but are generated directly from the 3D model. Any change in the model is instantly reflected in all associated drawing views and specifications, which ensures their relevance and significantly reduces manual labor and errors due to data inconsistencies .

In addition to generating documentation, Revit includes a set of built-in tools for performing various types of analysis, which is particularly valuable for designing sustainable and quality urban environments. Such tools include:

- Load-bearing structure analysis: The program allows you to specify loads and boundary conditions, creating an analytical model that can be used to pre-calculate structures or exported to specialized calculation packages.
- Energy Efficiency Analysis: Built-in tools allow for an early assessment of a building's potential energy consumption, taking into account its geometry, orientation, climate data and envelope properties.
- Illuminance and Insolation Analysis: Revit tools allow for solar motion studies, shadows for a specific geographic location and time of day, and calculations to estimate the level of natural light in spaces .

These capabilities allow to make informed design decisions aimed at improving the comfort, safety and resource efficiency of buildings, which is an integral part of the modern approach to urban development. Thus, Autodesk Revit, being a powerful BIM tool, lays the information and geometric foundation for the vast majority of urban projects related to the construction and reconstruction of buildings, and serves as a key source of data for subsequent integration into larger-scale urban models.

Autodesk AutoCAD and its vertical solutions: Precision Engineering and Spatial Planning

If Autodesk Revit is the core for BIM modeling of buildings and structures (vertical construction), then to solve problems related to infrastructure design, engineering preparation of territories and territorial planning (horizontal construction), the key role is played by the Autodesk AutoCAD platform and, in particular, its specialized vertical solutions. These tools provide the necessary accuracy, functionality for working with land and linear objects, and integration with geospatial data, forming the second most important component in the digital urban planning technology stack.

AutoCAD: Universal 2D drawing language and foundation for 3D

Despite the rapid spread of BIM technologies, the basic version of AutoCAD retains its importance and remains a ubiquitous tool in design activities around the world. Its role in modern workflows is multifaceted.

First, AutoCAD remains the de facto standard for creating detailed two-dimensional working documentation, situation plans, executive diagrams, and various drawings that require high line accuracy. Its native DWG file format is the recognized and most widely used standard for exchanging graphic data between different professionals, organizations, and software platforms.

Second, while Revit focuses on an object-oriented approach, AutoCAD provides fundamental and flexible drafting and basic 3D modeling tools. It is often used in the earliest, conceptual stages to quickly work through site layout options or to perform specific detailing tasks, the results of which can then be linked or imported into more complex BIM or GIS environments as a sub-base. For many engineers and designers, AutoCAD remains a familiar and effective environment for solving localized problems that do not require the creation of a full-fledged information model.

AutoCAD Civil 3D: A Specialized BIM Tool for Infrastructure

AutoCAD Civil 3D is a powerful vertical solution built on the AutoCAD and Map 3D platform, but is inherently a full-fledged BIM tool specifically designed for civil and infrastructure design. Civil 3D allows you to create not just drawings, but dynamic, intelligent 3D models of objects inscribed in the existing or project digital terrain model. The program is a key tool for solving a wide range of tasks of territorial planning and engineering preparation.

The key functionalities of Civil 3D include:

- Terrain modeling and analysis. One of the strongest aspects of the program is the ability to create dynamic three-dimensional terrain models (in Civil 3D they are called "surfaces") based on a variety of input data: geodetic points, laser scanning files, structural lines, horizons, and others. These models are dynamic, i.e. any changes in the source data automatically update the surface. Built-in analysis tools allow to perform accurate calculation of earthwork volumes

(excavation and embankment), to analyze the surface by slope and elevation, and to determine the boundaries of catchments . This functionality is indispensable for site selection, project feasibility assessment, drainage system design, and development of vertical layout plans.

- Corridor Modeling. For the design of linear-extended objects, such as roads and railways, canals, pipelines, in Civil 3D uses a powerful tool modeling "corridors". A corridor is a complex 3D model that is built on the basis of several key components: the route in plan, longitudinal profile and cross-sectional design. The dynamic relationship between these components allows the entire 3D road model with all slopes, ditches, and pavement layers to be automatically rebuilt and the scope of work to be recalculated when, for example, the alignment changes .

- Design of pipeline networks. The program contains specialized tools for the design and analysis of pressure and non-pressure pipeline networks, including storm and domestic sewerage, as well as water supply systems. The tools allow to perform hydraulic and hydrological calculations, check collisions and automatically generate network profiles .

- Site planning and site design. Civil 3D provides tools for automated subdivision of the territory into land plots ("plots") taking into account specified criteria (area, facade length, etc.), as well as for detailed design of vertical layout of area objects, such as parking lots, city squares or industrial sites .

- Automated documentation. Similar to Revit, Civil 3D automates the process of creating working documentation. Plans, longitudinal profiles, cross sections, and various sheets (e.g., earth mass volume sheets or bifurcation sheets) are dynamically linked to the 3D model. This ensures their relevance and significantly speeds up the process of documentation production .

The practical value of Civil 3D is confirmed by its application in large-scale urban planning projects around the world. Examples include projects in Al Ain (UAE) and Medellin (Colombia), where the program was used to process heterogeneous input data, parametric modeling in the development of area objects, detailed terrain modeling

and BIM interoperability to reduce manual calculations and improve the quality of design solutions .

AutoCAD Map 3D: GIS Data Integration and Management

If Civil 3D is a tool for creating a design model, AutoCAD Map 3D serves as a bridge between the world of CAD and the world of Geographic Information Systems (GIS). This vertical solution extends the functionality of basic AutoCAD with powerful tools for creating, editing, managing, and analyzing GIS data directly within the familiar AutoCAD environment .

The key role of Map 3D in the urban planning workflow is to provide designers with up-to-date geospatial information about the existing situation. The program provides the ability to connect directly to a wide range of GIS data sources without requiring their import or conversion. These can be Esri SHP files, connections to geodatabases (Esri, Oracle, SQL Server) or web-based mapping services (WMS, WFS).

By connecting GIS data, the designer can use it as a contextual background for his work. For example, it is possible to display layers with land parcel boundaries, zoning information, zones with special conditions of land use, environmental constraints, or existing surface and underground utility networks.

In addition to simple mapping, Map 3D provides tools for spatial query and analysis as well as thematic mapping. This allows, for example, highlighting all areas that fall within a water protection zone or coloring buildings according to the year they were built. Map 3D also provides correct management of coordinate systems, which is critical when working with data for large urban areas.

An important feature of Map 3D is the use of so-called industry models, which are structured data templates for specific engineering networks (water supply, sewerage, electrical networks, gas supply). This allows not just drawing lines, but creating intelligent GIS-objects with a set of attributes, which is used to collect and maintain data on engineering networks of the city .

Thus, the combination of AutoCAD, Civil 3D and Map 3D forms a powerful and flexible environment for solving the whole range of tasks related to engineering

preparation of the territory and territorial planning. AutoCAD serves as a universal platform and means of data exchange, Map 3D provides integration with the geospatial context, and Civil 3D acts as a BIM-tool for creating detailed, intelligent and dynamic models of infrastructure objects. These tools, in turn, are tightly integrated with Revit and 3ds Max to create a unified digital workflow, which will be discussed next.

Autodesk 3ds Max: Advanced visualization and simulation of urban environments

If Revit is a tool for creating information-rich essence of the project, and Civil 3D - for its accurate engineering "landing" on the ground, Autodesk 3ds Max acts as a key tool for its perception, analysis and communication. In modern urban planning, the role of visualization goes far beyond the creation of aesthetically pleasing images. It is becoming a powerful tool for analysis, a means of dialog with the public and the client, and an integral part of the design decision-making process. 3ds Max, being one of the industry's leading 3D modeling, animation and rendering software products, provides a comprehensive set of capabilities .

High-quality photorealistic visualization and animation

The main and best known function of 3ds Max is the creation of photorealistic static images (renders) and animations, which allow us to visualize with a high degree of fidelity how a designed object or urban environment will look like in reality . In the context of urban planning, this is crucial for several aspects:

- Communication within the project and with the client: Complex design solutions presented in the form of drawings or diagrams can be difficult to perceive by persons without specialized technical knowledge. High-quality visualization makes the project clear and tangible, allowing the customer and other stakeholders (investors, government officials) to more fully evaluate the proposed solutions and provide constructive feedback .
- Public interaction: Urban planning projects, especially large ones, affect the interests of many people. Realistic visualization of future streets, squares and buildings is an effective tool for public hearings and discussions, helping to clearly demonstrate the benefits of the project and alleviate possible concerns on the part

of residents.

- **Marketing and Investment Attraction:** For development projects, high-quality renderings and animations are a key marketing tool used in brochures, websites and presentations to attract buyers and investors long before construction is complete.

To achieve a high level of realism, 3ds Max offers advanced modeling tools (including polygonal, spline, and procedural modeling), extensive material libraries that support Physically-Based Rendering (PBR), and sophisticated lighting and camera controls . The integration of powerful rendering systems such as Arnold (included in the standard delivery) or popular third-party renderers such as Corona Renderer or V-Ray allows physically correct ray tracing, achieving the highest level of photorealism . It is important to emphasize that a high-quality visualization of urban planning projects should not only have aesthetic appeal, but also accurately reflect the technical and geometric characteristics of the project, embedded in BIM models and CAD drawings .

Environmental Simulation: Insolation, Lighting and Shadow Analysis

In addition to creating beautiful images, 3ds Max is a powerful tool for analyzing and simulating the light environment, which has direct relevance to sustainable urban design. The program allows detailed studies of daylight and shadow movement by creating a specialized daylighting system (e.g., Sun Positioner or Daylight System) in the scene .

This system allows you to precisely set the geographic coordinates of the project (latitude and longitude), select the date and time, and the direction to the north. Based on these data, the program calculates the position of the sun and correctly displays shadows cast by buildings and other objects. A key feature is the animation of the sun's movement during the day or even the whole year . By saving such animation as a video file, designers and planners can visually analyze:

- Insolation levels of residential buildings and public spaces, checking compliance with regulatory requirements.
- The impact of new construction on existing development: how the

projected building will shade neighboring houses, playgrounds or parks.

- Visual comfort in public spaces at different times of the day and year.
- Energy efficiency of buildings: the analysis helps to optimize building orientation and facade shape to maximize passive solar heating in winter or, conversely, to create shaded areas in summer .

Although 3ds Max provides powerful built-in tools, there are also specialized plugins (e.g., Shadow Analysis) that can offer presets tailored to specific local insolation norms, but it should be kept in mind that such plugins may provide illustrative rather than strictly normative results . In addition to shadow analysis, 3ds Max also contains artificial light analysis tools that can display numerical illuminance values (in lux or ft-candelas) directly on surfaces in the rendered scene, which is useful when designing street lighting .

Complex Scene Management and Animation

Urban projects almost always involve working with very large and complex scenes, including dozens and hundreds of buildings, infrastructure elements, landscaping, etc. 3ds Max provides a number of tools to effectively manage such scenes, which is critical to maintaining productivity.

A key approach is linking (linking) external files rather than importing them directly. The program allows you to create dynamic links to files from Revit (via FBX format or direct integration) and AutoCAD (via DWG format). This means that the main scene in 3ds Max remains relatively "light", loading geometry from external sources. When changes are made to the source model in Revit or AutoCAD, it can be easily updated in the 3ds Max scene without losing customized materials and lighting.

To optimize the work with a large number of similar objects (eg, trees, lights, cars) use mechanisms instancing (instancing) and proxy-objects. This allows you to place in the scene thousands of copies of one object, while the geometry of the object is stored in memory only once, which greatly saves resources.

In addition to static visualization, 3ds Max is a powerful animation tool. In the context of urban planning, it is used not only to create camera overflights ("walks" and "flights" in the future neighborhood), but also to animate the scene, making it more

realistic and informative. You can animate the movement of vehicles on the roads, as well as create and animate the flow of pedestrians, using both standard tools and specialized tools, such as the built-in Populate system, which allows you to quickly fill the scene with animated crowds of people .

Thus, Autodesk 3ds Max completes the triad of key tools, translating abstract data and geometry from BIM models and CAD drawings into a visually understandable, analyzable, and convincing format necessary for successful implementation and presentation of modern urban planning projects.

Integrated workflows and tool synergy

Analyzing the functionality of Revit, Civil 3D and 3ds Max shows that each of these software products is a powerful tool for solving its own range of tasks. However, their true potential in the context of the complex, multifaceted urban planning and construction process is revealed not in their isolated use, but in their synergistic integration. Creating a single, seamless digital workflow in which data moves freely and with minimal loss between different platforms is a key challenge to maximize efficiency, accuracy and quality of the end result.

This integrated approach enables a continuous chain of information creation and use: from conceptual modeling and detailed building design in Revit, through master plan and infrastructure engineering in Civil 3D, to final photorealistic visualization, analysis and presentation in 3ds Max. Such a workflow, unlike a traditional fragmented workflow, is often not linear but an iterative cycle where changes in one part of the project can be quickly and coherently transferred to other parts of the project.

Technical aspects of interoperability: Bridging the gap between software products

Effective collaboration between software products is built on two pillars: standardized data exchange formats and clear methodologies for their use.

Key data exchange formats:

- DWG (Drawing): AutoCAD's native format, which is the de facto industry standard for exchanging 2D and 3D geometry. Its main advantage is its high accuracy and widespread support. However, when transferring data from object-

oriented BIM environments (such as Revit or Civil 3D) to DWG, much of the "intelligence" - attribute information and parametric relationships - can be lost if the objects are not native to AutoCAD . Nevertheless, DWG remains indispensable for transferring base plans, topographic sub-bases and producing 2D documentation .

- IFC (Industry Foundation Classes): It is an open, neutral and internationally standardized data format specifically developed by buildingSMART to enable interoperability (interoperability) between different BIM software. Unlike DWG, IFC is designed to convey not only geometry but also rich semantic information such as attributes, classifications, and relationships between objects . IFC is the cornerstone of the OpenBIM concept, allowing architects, engineers, and designers working in different programs to efficiently exchange consistent data . This format is critical for transferring BIM models to GIS systems (e.g. Esri ArcGIS, which can work directly with IFC) or for coordinating with project participants using third-party software .

- FBX (Filmbox): A proprietary format developed by Autodesk that has become a standard for data exchange between 3D graphics, animation, and visualization software. FBX is great for transferring models from Revit or AutoCAD to 3ds Max because it efficiently preserves not only geometry but also visualization-critical elements such as materials, textures, light sources, cameras, and animation data .

Strategies for maintaining data integrity:

For data exchange to be successful, it is not enough to simply choose a format.

A number of rules and techniques must be followed:

- 1.Shared coordinates and georeferencing: This is absolutely necessary to correctly combine models from different sources (e.g., a building model from Revit and a master plan from Civil 3D) in a single space. From the very beginning of the project, a common insertion point and a common coordinate system for all sections of the project must be defined.

- 2.Linking vs. Importing: It is important to understand the difference

between these two approaches. *Importing* creates a static, independent copy of the data from the external file into the current file. *Linking* creates a dynamic link to the external file. Linking is generally preferred for collaborative workflows because when the source file is updated (e.g., the architect has made changes to the Revit model), the linked model in 3ds Max or Civil 3D can be easily and quickly updated .

3.Data preparation and "cleaning": Before transferring a model from one program to another, it often requires preparation: simplifying overly complex geometry, removing unused elements, checking and correctly organizing layers (in AutoCAD) or object categories (in Revit), and logically grouping elements. This provides a cleaner and faster data transfer and better performance in the receiving program .

Practical workflow scenarios: Connecting the dots

Based on the described technologies and formats, specific workflows are built based on the synergies between the tools.

- Revit to 3ds Max (for architectural and urban visualization): This is one of the most common and demanded workflows. The BIM model of a building or building complex created in Revit is transferred to 3ds Max to create photorealistic visualizations. The most efficient method is direct model linking, which allows for a "live" link for future updates . An alternative method is export via the FBX format . This process emphasizes correct material matching, geometry optimization, and handling of complex parametric families to achieve the best results .

- AutoCAD/Civil 3D to 3ds Max (for master plan and infrastructure visualization): A similar process is used to visualize master plans, vertical layout designs, roads, and other infrastructure objects created in Civil 3D or AutoCAD. DWG files with terrain models, road layouts, and landscaping plans are imported or linked to the scene in 3ds Max, where realistic materials (grass, asphalt, paving stones) are assigned, landscaping elements, small architectural forms are added, and lighting is customized . Complex Civil 3D objects, such as corridors or pipe networks, may require prior conversion to 3D solids or simplified meshes for better

processing in 3ds Max .

- Civil 3D and Revit integration (for coordinated building and site design):

This bidirectional workflow is the core for integrated design.

- *From Civil 3D to Revit:* An accurate elevation model (topo-surface), as well as the contours of designed roads, parking lots, and landscaping elements are transferred from Civil 3D to Revit. This allows architects to "plant" the building on the real terrain, take into account height differences and correctly design entrance groups and basements. The transfer can be done through exporting the surface to DWG/DXF with the subsequent creation of topography in Revit using this data .

- *From Revit to Civil 3D:* In turn, the contours and dimensions of buildings designed in Revit are transferred to Civil 3D. This is necessary for engineers-genetic planners to detail the vertical layout around buildings, design access roads, sidewalks and the correct connection of external utilities to the building. Advanced workflows using specialized plug-ins can even establish dynamic links between Civil 3D objects and native Revit geometry .

- AutoCAD to Revit (for basic information): A simple but commonly used workflow in which 2D drawings from AutoCAD (e.g., old archival plans, geodetic sub-bases) are linked to a Revit project as references for modeling or sketching .

Role of Cloud Platforms and the Common Data Environment (CDE)

Modern workflows are increasingly shifting towards cloud-based collaboration platforms. Platforms such as Autodesk Construction Cloud (ACC) and its BIM Collaborate Pro service are revolutionizing the way teams collaborate. They implement the concept of Common Data Environment (CDE - Common Data Environment) - a single centralized source of information for all project participants .

CDE ensures that all specialists - architects, designers, engineers, general planners, customers - work with the latest and most up-to-date versions of models and documents. This eliminates the confusion associated with mailing files and minimizes the risks of working with outdated data. ACC and BIM Collaborate Pro platforms

provide centralized data management, real-time collaboration on Revit and Civil 3D models, version control, and issue and comment tracking for interdisciplinary teams .

It is important to note that cloud platforms also support specialized collaboration technologies such as Data Shortcuts in Civil 3D. This mechanism allows project teams to share individual design objects (surfaces, paths, pipe networks) without attaching entire drawings, which facilitates parallel work on different parts of an infrastructure project. Integration of this technology with the cloud platform BIM Collaborate Pro allows organizing effective collaboration on master plan projects even for geographically distributed teams .

Thus, the triad of software products Revit, Civil 3D and 3ds Max, united through standardized data formats and cloud platforms for collaboration, forms a powerful and flexible digital ecosystem capable of providing effective solutions to the most complex problems of modern urban construction and spatial planning.

Chapter 3. Practical application: analyzing representative global cases

Introduction

After a detailed review of the conceptual foundations of digitalization and technological tools for urban planning, the logical and necessary step is to turn to actual practice. Theoretical statements and descriptions of the functionality of software products acquire true value only when they are confirmed in successfully implemented projects. This chapter is devoted to the analysis of representative global cases that demonstrate the practical application of integrated digital technologies, including building information modeling (BIM), computer-aided design (CAD) systems and visualization tools, in urban construction and spatial planning.

The aim of this analysis is to present an empirical framework illustrating how digital approaches specifically address complex engineering, urban planning and social challenges. We will consider projects of different scales and typologies: from unique infrastructure facilities to the comprehensive regeneration of urban areas and the development of transportation systems in megacities. This will allow us to identify

common patterns, key success factors, as well as typical difficulties arising on the path of digital transformation.

It is important to note that the success of digital technologies in the following cases is largely determined not just by the availability of advanced software, but by a clear strategy for its integration and management. As research shows, a structured and planned approach to the implementation of these technologies is required to realize their full potential . Key concepts such as a BIM Implementation Plan (BIP), which defines an organization's strategic goals, and a BIM Execution Plan (BEP), which regulates the processes and standards for a specific project, are integral attributes of successful digitalization. This emphasizes that technological sophistication must be accompanied by organizational and methodological changes to achieve meaningful and measurable results.

Case Study 1: Randselva Bridge, Hønefoss, Norway

Project Overview and Objectives

The Randselva Bridge project in Norway is one of the most striking and representative examples demonstrating the maturity and potential of BIM technology in modern infrastructure construction. The facility is a unique cantilever concrete bridge with a total length of 634 meters located near the town of Hønefoss . The bridge, which is part of the E16 highway, crosses a complex terrain including the Randselva River, a valley, an existing railway line and foothills, which predetermined the complexity of its geometry and design.

However, the main feature of the project that made it world-famous was the ambitious task set by the client, the Norwegian Public Roads Administration (Statens Vegvesen). The task was to realize the entire project solely on the basis of 3D models, with a complete rejection of traditional 2D drawings at all stages - from design to construction . This strategic decision made the Randselva Bridge the longest bridge in the world built entirely paperless and set a new standard for digitalization in the industry.

Such a bold move on the part of the public customer was not a spontaneous experiment. It was based on previous positive experiences with BIM, which recorded

a significant reduction in the number of Requests for Information (RFIs) during the construction phase . This fact indicates the client's purposeful desire to maximize the benefits of digital technologies, moving from their partial application to full, comprehensive integration. Such a progressive stance by government agencies often acts as a powerful catalyst for innovation, creating demand for new technologies and competencies and pushing the entire construction industry forward.

The technology stack employed

To realize such an ambitious task, a comprehensive set of digital tools was used, with information modeling and collaboration solutions at its core.

The central place in the technology stack was taken by the Tekla Structures software from Trimble, which was used for detailed structural BIM modeling, parametric design of structures and, most importantly, for modeling of reinforcement . The information richness of the model was brought to an extremely high level: each element in the BIM model contained about 50 attributes, including the exact labeling of each of the more than 200,000 reinforcing bars according to more than 200 concreting phases. Also, 250 prestressed ropes were detailed in the model .

Trimble Connect, a cloud-based Common Data Environment (CDE), was used to enable the geographically distributed team to work together and manage all project information. This platform became a single source of truth for all project participants, providing access to up-to-date versions of models and documents . An important role in model coordination and validation was played by Solibri software for automated model analysis and collision search .

A key aspect of the workflow was the emphasis on the OpenBIM concept, i.e. the use of open, non-proprietary data formats. More than 95% of information exchange between designers and general contractor was carried out via IFC (Industry Foundation Classes) files . This allowed to ensure compatibility between different software products and smooth interaction of all participants, which was critical in the conditions of an international project.

Finally, Trimble SiteVision augmented reality technology was an innovative tool during the construction phase. It allowed engineers and construction workers to

superimpose a real-scale 3D model of the bridge on the physical construction site using specialized equipment, which provided an unprecedented level of visibility, control, and verification of the installation work .

Description of the workflow and difficulties encountered

The project team was international and geographically distributed, with members located in four different countries: Norway, Denmark, Finland and Poland . This made the use of BIM, the Trimble Connect cloud platform and the specialized collaboration tool Tekla Model Sharing not just desirable, but absolutely necessary for successful project coordination and implementation.

The workflow was completely re-engineered for paperless technology. All design decisions were made and agreed on the basis of the 3D model. Ordering of materials, including complex geometry of reinforcement bars, was made directly from the model data. Special BIM-stations (BIM-kiosks) were organized at the construction site, and field crews were equipped with secure tablets for prompt access to the actual, detailed 3D-model at any point of the object .

The main difficulties of the project, as noted by the participants, were related not so much to the technologies as such, but to the practical implementation of the model-oriented approach directly on the construction site . The main challenges were:

- 1.The need for staff training: the general contractor PNC had no previous experience in building projects without the use of traditional drawings. Significant effort was required to train engineers, foremen, and workers to read and use 3D models on tablets and to use specialized viewing and analysis software .

- 2.Changing culture and habits: Moving away from drawings required overcoming psychological barriers and changing decades of established work practices.

- 3.Organization of construction processes: It was necessary to rearrange all logistics and sequence of operations based solely on information from the digital model.

Despite these challenges, BIM tools proved to be extremely effective. The tasks of detecting spatial collisions and developing solutions for additional reinforcement at

complex nodes were effectively solved by analyzing the model in Solibri and Tekla, thus avoiding many problems that would have occurred on site with the traditional approach .

Results achieved: Qualitative and quantitative indicators

The Ranselva Bridge project has demonstrated impressive and, in many ways, benchmark results, confirming the benefits of a fully digital approach.

Qualitative results:

- The project was successfully completed in 2022, becoming the longest bridge in the world built without a single 2D drawing .
- The highest degree of coordination and collaboration between geographically distributed project teams was achieved .
- Significantly improved understanding of the scope and sequence of work directly on the construction site due to constant access to a visual 3D model and the use of augmented reality tools .
- A more universal and unambiguous exchange of information between participants from different countries is ensured, as the 3D model does not require interpretation of national drawing standards .
- The project received two prestigious Tekla Global BIM Awards in the categories of Best BIM Project and Best Infrastructure Project .

Quantitative results:

- Dramatic reduction in errors and increase in quality: The most telling result is the installation accuracy. Out of approximately one thousand anchor holes, not a single one was placed incorrectly. This virtually unprecedented industry performance is directly attributed to the use of the BIM model as a single source of truth and the application of digital inspection tools .
- Saving time on future projects: Parametric scripts developed during a project for complex assemblies can be reused. It is estimated that up to 70% of these scripts can be applied on future similar projects, providing significant time savings .
- Long-term operational savings: Having an accurate digital "as-built" (as-

built) model provides the basis for effective management of an asset throughout its 100-year lifecycle. This will reduce the cost of operation, maintenance and future repairs .

Thus, the case of the Ranselv Bridge convincingly proves that the transition to fully model-oriented, paperless work processes in complex infrastructure projects is not only possible, but also economically justified, as it leads to a dramatic improvement in quality, accuracy and efficiency at all stages of the life cycle of the object.

Case Study 2: The Clichy-Batignolles Urban Regeneration Project (The Clichy-Batignolles), Paris, France

Project overview and objectives set

While the case of the Ranselv Bridge demonstrates the depth of BIM application at the level of a highly complex engineering site, the Clichy-Batignolles project in Paris shows the breadth and strategic importance of digital technologies in the complex transformation of large urban areas. Clichy-Batignolles is one of the largest and most ambitious urban regeneration projects in modern Europe, covering an area of 54 hectares in the 17th arrondissement of the French capital .

The main goal of the project is not just to develop the territory of the former railway marshalling yard and adjacent industrial areas, but to transform it into an exemplary eco-district demonstrating advanced principles of sustainable urban development with the ultimate, highly ambitious goal of achieving zero or near-zero carbon emissions .

The project envisages the creation of a multifunctional, balanced and socially-oriented urban environment. It includes:

- Around 3,400 housing units, with a significant proportion allocated to social and affordable housing, aiming to create a mixed social environment.
- Over 300,000 m² of office and commercial space, including landmark public buildings such as the new Palais de Justice of Paris (designed by Renzo Piano), a theater, a cinema and other facilities.
- Extensive public spaces, the centerpiece of which is the large 10-hectare Martin Luther King City Park .

In addition to environmental and architectural objectives, the project solves the most important urban planning problem - the restoration of the spatial and social cohesion of the urban fabric. The territory of the former railroad for many years served as a barrier separating the historic center of Paris, more affluent areas in the west and working-class neighborhoods in the north, including the suburb of Clichy-la-Garenne. The new neighborhood is intended to be a "bridge" connecting these disparate parts of the city . Thus, Clichy-Batignolles represents a comprehensive urban transformation strategy where environmental sustainability, social inclusion and high quality of the urban environment are not secondary aspects but key drivers and main objectives of the project.

The technology stack used

In order to address such complex and interrelated challenges, Information Modeling (BIM) was identified as a key technology. In this project, BIM was applied not so much for the detailing of individual buildings, but as a tool for master planning and strategic analysis at a district-wide level. In French practice, the term "maquette numérique" (digital maquette) is often used to refer to digital models, which fully captures the essence of the approach applied in Clichy-Batignolles .

The BIM methodology was used to create a comprehensive digital representation of the entire project, integrating the various factors affecting the design and construction process. This allowed for detailed planning, analysis and visualization of all aspects of the future district before physical implementation . Although specific names of software products such as Revit or 3ds Max are not directly mentioned in the available materials in relation to this project, the scope and nature of the tasks suggest the use of appropriate tools. Autodesk software solutions such as:

- Revit for detailed design of individual buildings and structures;
- InfraWorks or Spacemaker for conceptual planning, development of master plan options and analysis of the urban environment (insolation, wind loads, noise impact) ;
- Civil 3D for infrastructure design and vertical layout;
- 3ds Max for high quality visualization and public communication,

functionally fully meet the needs of such a complex urban project. The application of BIM was aimed at addressing the strategic challenges of sustainable development:

- Optimizing the energy consumption of the district as a whole by analyzing the mutual arrangement of buildings, their orientation and shape.
- Maximizing the use of renewable energy sources, in particular geothermal energy and solar panels, the location of which was planned through model analysis.
- Designing efficient water management systems, including rainwater harvesting and utilization.
- Optimizing the location of green spaces to create a comfortable microclimate and maintain biodiversity.

This case demonstrates an important evolution in the application of BIM - moving from the level of individual objects (Building Information Modeling) to the level of integrated urban planning (City/Campus Information Modeling).

Description of the workflow and difficulties encountered

The project was implemented by a specially created development company Paris Batignolles Aménagement, later renamed Paris & Métropole aménagement (P&Ma) . The entire workflow was initially structured around the achievement of ambitious sustainability goals with the active use of BIM as a coordination and analysis tool .

Given the huge scale of the project (54 hectares), its multifunctionality and the large number of parties involved (dozens of architectural offices, engineers of various specializations, ecologists, transportation specialists, construction companies, city authorities), one of the main challenges was undoubtedly the coordination and management of huge amounts of information. Even with advanced BIM tools, ensuring effective data exchange, consistency of models from different teams and timely change management at this scale is a non-trivial organizational and technological challenge.

Common challenges associated with BIM implementation, such as the need for all project participants to have the appropriate knowledge, skills and experience to effectively utilize the technology , have also likely occurred. This once again emphasizes that BIM is a powerful tool, but its effectiveness is directly dependent on

well-defined project management processes (having a BEP in place), effective communication and established collaboration between all participants.

Results achieved: Qualitative and quantitative indicators

The Clichy-Batignolles project is a long-term project, with full completion scheduled for 2025 . However, it is already possible to talk about the significant results achieved and to assess its impact.

Qualitative results:

- **Creation of a new urban center of attraction:** The project has successfully transformed a depressed, isolated area into a lively and attractive district of Paris.
- **Formation of a high-quality urban environment:** The centerpiece of the project - the 10-hectare Martin Luther King Park - has already become a favorite recreation spot for Parisians and an example of modern landscape design .
- **Realization of the principles of social inclusion:** The creation of a significant share of affordable housing contributes to the formation of a balanced social environment.

Quantitative outcomes and targets:

- **Zero CO2 emissions:** The main objective of the project is to achieve zero or near-zero carbon footprint status for the area. This is planned to be achieved by using 100% renewable energy sources for heating and hot water (mainly geothermal energy) and by installing 35,000 m² of photovoltaic panels on the roofs.
- **Energy efficiency:** Strict energy consumption targets have been set for all buildings, significantly lower than standard requirements.
- **Waste and water management:** The project includes innovative pneumatic garbage collection systems and integrated rainwater management solutions.

While specific quantitative measures of reduced construction time or collisions for this project are not available in the available materials, a general benefit of BIM fully applicable to such large-scale urban initiatives is noted: reduced public opposition and opposition to infrastructure projects. Studies show that accurate and realistic visualization of final results using BIM models can reduce the number of objections from the public by up to 25% . In the more general context of BIM application in civil

engineering, such indicators as reduction of design errors by 40% and reduction of construction waste by 5% are also mentioned, which is certainly relevant for a project of this scale.

The successful realization of the stated ambitious sustainability goals in the Clichy-Batignolles project will be a major global precedent. The quantitative indicators of building energy efficiency, CO₂ emission reductions, the share of renewable energy used and other environmental parameters that will be recorded at the end of the project will be of great importance for the formation of best practices in the field of sustainable urban construction and can serve as a benchmark for future projects around the world.

Case Study 3: Ataköy-İkitelli Metro Line, Istanbul, Türkiye

Project overview and objectives

The M9 Ataköy – İkitelli metro line project is a prime example of the application of BIM technologies in the creation of complex transport infrastructure in the dense urban development of one of the largest megacities in the world. The project is the construction of a new line of the Istanbul Metro on the European side of the city. The line is 13.4 km long , includes 12 stations and connects five densely populated areas of the city, providing transport services to the strategically important Basın Express highway .

The main objective of the project is not only to build a new line, but also to ensure its effective integration with six other existing and planned urban rail transport lines , including the city's main transport artery, the Marmaray Line . This will significantly improve the connectivity and overall efficiency of the entire Istanbul transport network. The project is technically complex and includes the construction of the main tunnels (using both TBM tunnel boring machines and the new Austrian tunnel construction method NATM), station complexes constructed using both open and closed methods, and associated infrastructure . The projected carrying capacity of the line is approximately 412,000 passengers per day, and the travel time between the end stations should be reduced to 21.5 minutes .

The most important feature of this project is that it was one of the first metro projects in Turkey, the competition for which included mandatory requirements for the

use of BIM at all stages of the life cycle . This decision, initiated by the customer (the Istanbul Municipality, which has been consistently implementing BIM in its projects since 2015), played a key role in the selection of contractors and determined the high level of digitalization of the project. This example once again confirms the thesis about the decisive role of the customer as a driver of technological innovation in the construction industry .

Technology stack used

The Ataköy-İkitelli metro line project was fully implemented using the information modeling system. The leading design organization, Prota Engineering, applied the 5D BIM methodology in this project , which demonstrates the high level of maturity of BIM processes. This approach covers not only the creation of a three-dimensional geometric model (3D), but also its integration with scheduling (4D - time) and cost management (5D - money), ensuring comprehensive project management .

The project actively used software products from the Autodesk ecosystem . In particular:

- Revit was used for detailed architectural, structural and engineering design of station complexes and other structures.
- Navisworks was used for interdisciplinary coordination, assembly of composite models and automated clash detection .

In addition, in the general practice of Prota Engineering, a wide range of tools are used to implement BIM projects, including Dynamo for visual programming, parametric design and automation of routine tasks, as well as specialized software for structural analysis and design, such as Tekla Structures and the company's own development ProtaStructure .

The use of 5D BIM in such a large and complex infrastructure project highlights the qualitative shift from using BIM primarily for geometric modeling and clash detection to its use as a tool for integrated project management , allowing for real-time monitoring of the progress of work and its compliance with the budget. For the successful application of advanced BIM technologies in the Ataköy – İkitelli metro line project, the Prota BIM Team was nominated for the prestigious international Autodesk

AEC Excellence Awards in 2018, which is recognition of the high level of its competence by the global expert community .

Description of the workflow and the difficulties encountered

The workflow developed by Prota Engineering covered all stages and sections of the design: from the development of the concept and preliminary design to the release of detailed working documentation. This included the design of the route, tunnels, station complexes (architecture, interiors, finishing works), supporting structures, the entire complex of engineering systems (ventilation, heating, water supply, fire extinguishing), power supply and communication systems, as well as coordination with geological and geodetic survey data .

Model-based coordination was a central element of the workflow . The Prota BIM team used models created by all project participants to ensure interdisciplinary coordination and the timely detection and resolution of clashes at the earliest design stages when changes are least costly . The company's general practice actively uses 4D planning (integrating the model with the construction schedule to simulate the construction process) and parametric design methods , especially for complex geometric objects such as tunnel junctions . All workflows were built on the basis of advanced international standards, such as the British BS 1192 and PAS 1192-2:2013 .

Despite the obvious advantages of BIM, the implementation and use of these technologies in large-scale projects inevitably involves certain difficulties. These could include:

- Coordinating the work of multiple disciplines and ensuring the quality and consistency of data in models from different performers.
- Heterogeneity in understanding and expectations of BIM among different stakeholders. A study conducted on six Istanbul metro projects (including, probably, the Ataköy-İkitelli line) showed that although working on BIM projects generally becomes less complex with experience, perceptions and expectations of the technology can vary significantly among designers, contractors and client representatives . This points to the importance of not only the technological but also the organizational component of BIM implementation, including training and

the formation of a common culture.

- The need to adapt standard workflows to specific engineering tasks. For example, for the İkitelli-Ataköy project, the development of an alternative workflow for managing work volumes and generating certificates of completion for diaphragm walls is mentioned . This demonstrates the flexibility of the BIM approach and the ability of the team to adapt tools to specific tasks, which is a sign of a deep understanding of both the technology itself and the specifics of the designed object.

Achieved results: Qualitative and quantitative indicators

One of the most significant qualitative results of the Ataköy – İkitelli metro line project was its nomination for the final of the prestigious international Autodesk AEC Excellence Awards in 2018 . This in itself is an objective recognition of the high level of implementation of BIM technologies and the innovative approach of the project team by the global professional community.

The use of BIM has contributed to a significant improvement in coordination between different disciplines, early identification and resolution of thousands of clashes , and has provided the opportunity for comprehensive analysis and visualization of various design solutions, which ultimately improved the quality of the project .

Although there are no specific quantitative data on design and construction time reductions or cost savings specifically for this project in the materials provided, the general benefits of BIM claimed by Prota include “fewer errors, reduced waste, time savings and reduced project costs” .

The most important and most important result for the city and its residents is the successful completion of the project. The Ataköy-İkitelli metro line was officially opened and began operating in March 2024 , which indicates the timely and successful implementation of the project. In the long term, the project will provide significant improvements in transport accessibility and reduction of travel time for millions of Istanbul residents, making a significant contribution to the sustainable development of the metropolis .

Cross-case analysis and key findings

The analysis of the presented case studies – the Ranselva Bridge, the Clichy-Batignolles regeneration project and the Ataköy-İkitelli metro line – allows us to identify a number of common patterns and key success factors in the implementation of BIM, CAD and visualization tools in urban development and territorial planning, despite significant differences in the scale, geography and typology of the projects themselves.

Comparative overview of technologies and workflows

Despite differences in the specific software products used as core software (e.g. Tekla/Trimble in the Ranselva Bridge project and the Autodesk ecosystem in the Ataköy-İkitelli metro line project), all the cases reviewed demonstrate commitment to the general, fundamental principles of the model-based approach. The key technological components that ensured success were:

- BIM modeling platforms: In each case, the core of the project was a data-rich 3D model created in a specialized BIM editor.
- Common Data Environment (CDE): The CDE is the foundation for collaboration. Centralized access to up-to-date information for all project participants was achieved through platforms such as Trimble Connect in Norway or through standards-based processes in Turkey.
- Coordination and clash detection tools: Software such as Navisworks or Solibri played a vital role in preventing errors at early stages, allowing thousands of spatial and logical intersections to be identified and resolved in a timely manner.
- OpenBIM Support: The use of open, non-proprietary formats, in particular IFC, was critical to ensure interoperability between different platforms and participants, as was particularly demonstrated in the international Ranselva Bridge project.
- Visualisation and simulation tools: In all projects, visualisation was used not only for final presentations, but also as a working tool for analysis (e.g. sustainability analysis in Clichy-Batignolles), simulation (4D planning in Istanbul) and as a tool for on-site control (augmented reality in the Ranselva project).

The work processes in all cases are characterized by an emphasis on interdisciplinary coordination and early problem identification. The Ranselva Bridge project stands out for its complete elimination of 2D drawings, which required a radical restructuring of all processes and the highest level of model detail. The Ataköy-İkitelli metro line project demonstrates the use of 5D BIM , integrating time and cost into the model for integrated management. The Clichy-Batignolles project demonstrates the use of BIM to address strategic issues of sustainable urban development at the master planning level.

Common problems and effective solutions

A comparison of cases allows us to identify common challenges that projects face when transitioning to digital rails:

1. Need for staff training: The transition to BIM requires new skills and competencies for both designers and builders.
2. Cultural and psychological barriers: Overcoming resistance to change and the habit of working with traditional 2D drawings is a non-trivial task.
3. Coordinating large and/or geographically distributed teams: Effective information and communication management requires clear rules and powerful platforms.
4. Ensuring the quality and consistency of data across models from different vendors.

Effective solutions that contributed to the success of projects also have common features:

- Clear requirements and will on the part of the client: Mandatory requirements (mandates) for the use of BIM (as in Istanbul and Norway) or ambitious sustainability targets (as in Paris) are a powerful incentive for innovation.
- Implementation of a Common Data Environment (CDE) in some form to centralize information.
- Significant investment in training and technical support for teams.
- Using parametric modeling to solve complex geometric and design

problems and automate routine operations .

- Willingness to adapt processes and develop customized solutions for specific project tasks, as was done for the diaphragm wall works in Istanbul .

Table 1. Cross-case analysis of key project characteristics

Characteristic	Ranselva Bridge (Norway)	Clichy-Batignolles (Paris, France)	Atakoy-Ikitelli Metro Line (Istanbul, Türkiye)
Main tasks/goals	Construction of a bridge entirely in 3D without 2D drawings, OpenBIM.	Redevelopment of an industrial zone, creation of a sustainable eco-district with zero CO ₂ emissions.	Construction of a new metro line, integration with the transport network, mandatory requirement for 5D BIM.
Key technologies	Tekla Structures, Trimble Connect (CDE), Trimble SiteVision (AR), IFC, Solibri.	BIM for master planning and sustainability, "maquette numérique", software for urban design and analysis.	Revit, Navisworks, 5D BIM (Prota), Dynamo, CDE (standards-based).
Main aspects of the work process	Completely paperless, OpenBIM, parametric design, control via AR.	BIM for strategic sustainability analysis, multi-stakeholder coordination.	5D BIM (integration with cost and schedule), model-based coordination, 4D planning.
Main difficulties	Personnel training, work on a construction site according to a model, coordination of a distributed team.	Coordinating a large-scale project, managing information, achieving ambitious sustainability goals.	Coordination of multiple disciplines, different understanding of BIM, adaptation of standard processes.
Key quality results	The longest bridge without 2D drawings, international awards, highest precision.	Creation of a model eco-district (in progress), iconic city park, reduction of resident opposition (expected).	Autodesk AEC Excellence Awards nomination, improved coordination, timely line opening.
Key quantitative results	Savings on future projects (up to 70% of scripts), reduction of errors (0 errors per ~1000 anchors).	Target: zero CO ₂ emissions (in progress); 5% waste reduction (overall assessment for BIM) .	Timely commissioning, expected reduction in travel time for 412 thousand passengers/day.

The Role of Visualization in Project Transformation

Case analysis shows that the role of visualization in modern projects is changing dramatically. It is no longer just a function of creating final renders for presentations and is becoming an active tool at all stages of the life cycle :

- At the planning and design stage: for analysis of options, simulation (e.g. traffic flows, insolation, 4D construction schedule), adoption and verification of design decisions.
- At the approval stage: for a more visual and unambiguous presentation of design solutions to the customer and other interested parties, which speeds up the approval process.
- During the construction phase: to monitor the execution of works, to take them out into nature, to instruct workers and to improve safety. The use of augmented reality in the Ranselva project is a prime example of this new role.
- In interaction with the public: to demonstrate the future appearance of urban spaces and infrastructure facilities, which contributes to citizen involvement, reducing social tension and increasing the level of trust in the project .

Regardless of the specific software stack used, key success factors include the maturity of BIM processes, the availability and effective use of a Common Data Environment (CDE), and the commitment of all project participants to model-based collaboration . This is confirmed by a comparison of the Ranselva (Trimble core stack) and Ataköy-İkitelli (Autodesk core stack) projects, both of which achieved outstanding results.

Conclusion to Chapter 3

The analysis of the presented empirical cases – the Ranselva Bridge, the Clichy-Batignolles regeneration project and the Ataköy-İkitelli metro line – convincingly demonstrates the practical significance and transformative impact of integrated digital technologies on modern urban construction and territorial planning. These examples from global practice confirm the theoretical provisions of the monograph on the high potential of BIM, CAD and visualization tools for solving the most complex engineering, urban planning and social problems.

Empirical data show that the successful application of digital technologies is not only a technological process, but also a complex socio-technical process . It requires significant changes in the design and construction culture, in the organization of work, in the methods of interaction between numerous project participants, as well as significant investments in training and development of human capital. Key success factors include a clear implementation strategy, an active and demanding position of the customer, the use of common data environments, commitment to the principles of open interaction (OpenBIM), as well as the willingness of teams to adapt and develop customized solutions for the specifics of the project.

The presented cases emphasize that digital technologies not only improve the efficiency and quality of design and construction, reduce errors and optimize costs, but also solve larger-scale problems, such as creating a sustainable and comfortable urban environment, improving transport infrastructure and involving the public in urban development processes. Further research can be aimed at a more in-depth quantitative analysis of the benefits of using BIM in various types of urban projects, as well as developing methods for assessing the maturity of BIM processes and their impact on the final results. Practical application of the identified successful approaches and overcoming existing barriers will contribute to further digital transformation of the construction industry and urban economy, shaping the cities of the future.

Chapter 4. Prospects and future directions of development

Introduction

The analysis of conceptual frameworks, tools and practical cases conducted in the previous chapters convincingly proves that digitalization is not just one of the trends, but a fundamental driving force determining the present and future of urban development. We are entering an era when the isolated application of individual technological solutions gives way to the formation of an integrated digital ecosystem for urban planning and management. The future of urban environments is inextricably linked with how key technologies - Building Information Modeling (BIM), the concept of the "Digital Twin of the City" (DTC), Artificial Intelligence (AI), Virtual and

Augmented Reality (VR/AR), the Internet of Things (IoT) and cloud platforms - will be mastered, integrated and managed.

This chapter is predictive in nature and aims to identify the main vectors of development of these technologies and their combined potential to solve the most complex urban problems, from ensuring sustainable development to improving the quality of life of city residents. The “radical digitalization” of the architectural and construction industry, stimulated by the synergy of BIM and AI, has already led to the emergence of the concept of “smart cities” that use information technologies to improve operational efficiency and sustainability . The Internet of Things, in turn, plays a revolutionary role in urban management . This transformation is not just the introduction of new tools, but a fundamental change in the ways of conceptualizing, planning, constructing and managing urban environments .

Driving these changes is the growing complexity of urban challenges. Rapid growth in urban populations (70% of the world’s population is projected to live in cities by 2050), worsening climate change impacts, resource depletion, and the urgent need to create more sustainable and resilient urban systems require innovative, science-based solutions . The technologies discussed in this chapter are not just innovations in search of applications, but responses to these pressing needs. Their success will be measured by their ability to effectively address real-world urban problems, creating safer, more comfortable, and more sustainable cities for all.

From Building Information Modeling to Urban Digital Twins: An Evolutionary Trajectory

Expanding Horizons of BIM in Urban Planning

Building information modelling (BIM) should not be seen as a static, once-and-for-all defined tool, but as a dynamically developing technology that lays the foundation for digital urbanism. As shown in previous chapters, BIM goes far beyond simple 3D modelling, offering advanced capabilities for data integration and lifecycle management of objects. Today, this technology plays a key role in increasing the accuracy, efficiency and sustainability of urban planning processes .

BIM enables the creation of detailed 3D models of urban areas that help visualise potential development projects and assess their comprehensive impact on the environment and society. Using BIM enables urban planners to make more informed decisions, leading to better designed and more sustainable urban spaces .

The scope of BIM in urban planning is vast and constantly expanding, integrating every detail of design and construction and covering everything from the architecture of individual buildings to the planning of entire infrastructure complexes. However, the most important trend is the evolution of BIM from a project-specific tool to a fundamental information layer for more complex city-level systems . Detailed, data-rich models created with BIM for individual buildings or infrastructure assets are increasingly seen as essential components or “building blocks” that are aggregated and complemented by real-time data to form Digital Twins of Cities (DTCs). BIM is thus not being replaced, but rather absorbed and extended by the DTC concept, which represents a logical transition from the micro (building/project) to the macro (city) scale of digital representation.

Successful and widespread adoption of BIM, including standardized data formats (such as IFC) and proven collaboration practices, is a critical prerequisite for effective implementation of DTC at the city scale. Without mature BIM processes, creating comprehensive and interoperable digital twins becomes a significantly more challenging task. Therefore, the maturity of BIM implementation in the AEC industry directly impacts the feasibility and complexity of developing reliable Digital Twins of cities.

Digital Twin of the City (DTC): A Paradigm Shift in City Management

The concept of the “Digital Twin of the City” (DTC) represents a significant leap forward from traditional BIM models, marking a paradigm shift in urban management. DTC is a dynamic digital model that reflects the actual urban environment in real time, with an emphasis on monitoring and responding to current conditions (“nowcasting”) rather than just predicting future states . In contrast to long-term forecasting, DTC emphasizes interaction with streaming data and the collaboration of different city services.

The key components that make up DTC include:

- Information models (BIM and GIS): serve as the basic framework describing the physical assets of the city.
- Internet of Things (IoT) sensors are the “nervous system” that collects data about the state of the urban environment in real time.
- Data networks (e.g. 5G): provide fast and reliable data delivery.
- Data storage and processing systems: cloud platforms and data processing centers.
- Cybersecurity tools: to protect critical city information .

DTC takes the BIM concept further by integrating operational data, modeling broader system interactions (transport, energy, climate) and focusing on continuous management and decision support rather than primarily on design and construction. While BIM models are detailed representations of physical assets, DTC aims to model the behaviour and processes of the city itself.

DTCs provide decision makers with actionable insights and act as a digital sandbox for experimentation without risking the real world . The application areas of DTCs are extremely diverse:

- Ecology and sustainability: mitigating the effects of heat islands, planning for population growth and protecting biodiversity (case of Uppsala, Sweden) .
- Emergency management: flood forecasting (case of Incheon, South Korea), fire safety management, disaster preparedness (case of Grenada) .
- Operational management: traffic optimization, urban sanitation and facility management (Schiphol Airport case, Netherlands) .
- Social planning: adapting cities to the needs of an ageing population using data from wearable IoT devices (the URBANAGE project in the EU) .

The introduction of DTC marks a fundamental shift from a “project-oriented” view of urban development to a “system-oriented” and “operation-oriented” approach . The focus is no longer on the life cycle of a single construction project, but on the continuous management of the life cycle of the entire urban system.

However, the power of DTC, based on rich, integrated, real-time data, inevitably also gives rise to complex governance challenges. Questions of data ownership, privacy, security, accessibility, and the ethics of algorithmic decision-making come to the fore. The success and public acceptance of DTC will depend in large part on the creation of robust and transparent governance frameworks that proactively address these issues. Without citizen trust, the potential of this disruptive technology could be undermined .

Synergetic technologies transforming urban planning practice

The evolution from BIM to Digital Twins of cities is a central, but not the only, vector of digital transformation. Its true potential is revealed in the convergence with a range of other disruptive technologies that, acting together, can radically change approaches to the analysis, design and management of urban environments. Artificial intelligence, immersive realities and the Internet of Things are no longer niche or experimental tools, but are becoming integral components of an integrated urban digital ecosystem.

Artificial Intelligence and Generative Design: Automation of Analysis and Form Optimization

Artificial intelligence (AI), including machine learning and especially generative AI, has truly transformative potential for urban development. AI can process vast and diverse arrays of urban data for predictive analytics, improve the quality of decisions, and model complex urban systems . The use of generative design for automated optimization of urban planning, research into new design solutions, and acceleration of the design process itself is becoming one of the key and most promising areas.

In urban planning, AI helps classify and analyze large volumes of data, making planning processes more efficient, improving environmental conditions, and enhancing public engagement . It contributes to the development of predictive analytics to forecast the impact of decisions, refine the decision-making process, and optimize geospatial tasks . AI can be used to automatically analyze development proposals for compliance with regulations, analyze proposed changes to zoning regulations, and optimize master plans .

Generative design , driven by AI algorithms, uses computing power to autonomously generate and evaluate thousands of diverse design options based on given parameters and constraints (e.g. building density, solar requirements, budget) . This marks a shift from traditional design, where a human sequentially generates and tests multiple options, to a new approach where a human acts as a curator defining goals and criteria, and a machine generates a wide range of optimized alternatives. This approach enables the creation of smarter, healthier, more sustainable, and more inclusive cities . In architecture, it is used to explore new building forms and the use of more sustainable materials .

Ethical issues, data privacy concerns, the risk of creating an AI divide, the social impact of automation, and complex governance issues come to the fore . The high cost of building and maintaining AI infrastructure and, crucially, the potential bias of algorithms due to incomplete or biased data are also major concerns . If AI-generated urban planning recommendations cannot be clearly explained or if their hidden biases are not understood, it will be difficult to gain public trust and ensure fair outcomes.

Immersive Realities (VR/AR): Improving Visualization, Collaboration, and Engagement

Virtual (VR) and augmented reality (AR) are revolutionizing the way we visualize, perceive, and collaborate in urban planning. Integrating BIM models with VR/AR for immersive project review, stakeholder communication, and deeper understanding of proposed changes is becoming increasingly common.

Exporting BIM models (e.g. Revit files) to virtual reality environments (such as Unreal Engine or Unity) allows one to literally “visit” the designed building or the future street before construction begins . This enables architects, engineers and, most importantly, customers and future users to evaluate the project not based on flat drawings, but in real scale, to feel the space, check the ergonomics and visual characteristics.

Augmented reality (AR) , in turn, superimposes digital models onto an image of the real world using a smartphone camera or specialized glasses . This opens up unique possibilities:

- At the construction site: engineers can see the design position of structures or hidden utilities (e.g. underground pipes) directly at the place of their installation, which radically reduces the number of errors .

- In urban planning, planners can, while standing on an empty lot, “see” on their device screen how a proposed building will fit into the surrounding development, how it will affect viewpoints, and what shadows it will cast .

These technologies are particularly valuable in the context of public engagement. Traditional public hearing formats with complex drawings are often ineffective. VR and AR make urban plans intuitive for non-specialists, significantly increasing their level of engagement. Research shows that AR can increase public participation by 45% by making zoning regulations and projects more understandable through interactive 3D models. VR can be used in participatory design workshops, allowing residents, including even children and vulnerable groups, to actively participate in the creation of future urban spaces.

However, there are challenges here too: technological limitations (cost of equipment, computing power), physical and psychological barriers for some users, as well as ethical issues related to the possible manipulation of public opinion through the creation of overly idealized virtual scenarios .

Internet of Things (IoT): Weaving a Real-Time Web of Urban Intelligence

The Internet of Things (IoT) is having a profound and pervasive impact on spatial planning, forming the sensory foundation for adaptive urban environments. Networks of interconnected sensors and devices embedded in urban infrastructure generate vast amounts of real-time data that feed Digital Twins of cities and enable dynamic monitoring and management of urban infrastructure, environmental health, and resource consumption.

IoT is a key enabler for the creation of smart cities, enabling real-time monitoring and management of aspects of urban life such as street lighting, traffic, air quality and waste management. IoT sensors are the hardware component of DTC, its “sense organs”. In territorial planning, IoT affects:

- Transport management: smart traffic lights, traffic congestion sensors,

driver information systems.

- Environmental monitoring: air quality, water pollution, noise level sensors.
- Energy management: smart grids and smart lighting that adjusts brightness based on the presence of people or vehicles.
- Infrastructure maintenance: sensors on bridges, pipelines or building elements that signal the need for predictive repairs.

The benefits of IoT implementation include improved quality of life, streamlined public services, support for sustainable development , increased resilience of cities to the effects of climate change , and reduced operational costs . However, the widespread adoption of IoT also raises serious concerns about the security and privacy of collected data, the risk of information overload, compatibility issues between devices from different manufacturers, and high initial investment costs . Creating a “sentient city” that can sense and monitor the processes occurring within it requires the development of strong ethical standards and transparent data policies.

Transforming Workflows: The Impact of Cloud Platforms and Collaboration Tools

Redefining Collaboration in Urban Development

The convergence of the technologies described above would not be possible without a fundamental shift in the way collaboration is organized. Cloud platforms and advanced collaboration tools are fundamentally changing the workflows and interactions between the various professionals involved in urban planning and development. There is a tectonic shift from isolated, sequential operations to integrated, real-time teamwork, facilitated by Common Data Environments (CDE) and unified communication platforms.

Cloud solutions such as Autodesk Construction Cloud provide a single, centralized environment for all project participants-architects, engineers, contractors, clients, and other stakeholders. This ensures that everyone is working with the most current and consistent information, creating what is known as a “Single Source of Truth” . This approach eliminates the delays, errors, and data loss associated with

traditional file sharing and facilitates seamless collaboration between professionals, regardless of their physical location.

The key benefits of this approach are:

- Real-time operation: Updates made by one participant are instantly available to all others, reducing approval and decision cycles .
- Mobility and accessibility: Information is available anytime and anywhere, often via mobile devices on the construction site, even offline .
- Integration of tools: Platforms combine various tools (BIM modeling, document management, comment tracking) into a single workflow, which increases its efficiency and transparency.
- Democratization of access: Cloud platforms can lower the barrier to entry into large projects for smaller firms or niche specialists who may have previously been excluded due to limitations of their own IT infrastructure or geographic distance.

However, the centralization of data on third-party servers also raises important questions about data ownership, responsibility for its security, dependence on a specific provider, and long-term archiving of information , which requires careful legal and organizational regulation, especially in projects of national importance .

Evolution of planning tools and methodologies

A new generation of cloud-based tools and the data flows they drive are driving the evolution of urban planning methodologies themselves. There is a steady shift towards more data-driven, iterative and adaptive processes, facilitated by real-time analytics, advanced modelling capabilities and mobile access to information.

Access to centralized data and real-time analytics enables planners to make more informed decisions based on current conditions and forecasts. Cloud platforms that support BIM and other modeling tools facilitate rapid iterations and exploration of a wide range of design alternatives. Digital twins of cities, often hosted in the cloud, enable testing of various development scenarios (“what if?”) without risking the physical environment.

This facilitates a shift from traditional, static master plans, which often become obsolete before they are fully implemented, to more dynamic and adaptive urban strategies. Planning becomes less focused on creating a fixed end state and more focused on continuous monitoring, learning and adjustment in response to changing needs or unforeseen impacts.

As urban planning becomes more and more intensive in terms of data-driven and dependent on sophisticated digital tools, a skill set that required of an urban planner is expanding significantly. It must include digital literacy, basic data analysis, critical interpretation, and the ability to curate information from a variety of sources . This does not mean that every planner must be a programmer, but a certain level of technological awareness and understanding of data principles is becoming indispensable.

Technological imperatives for sustainable urban development

This section summarizes how the emerging technologies discussed (BIM, DTC, AI, VR/AR, IoT, cloud) collectively contribute to the creation of more sustainable urban environments. Three key aspects of sustainability are considered: environmental sustainability, safety and resilience, and the creation of comfortable and inclusive cities.

Promoting environmental sustainability

Digital technologies play a key role in improving environmental analysis, optimizing resource management and designing green urban systems.

- BIM enables early assessment of environmental impact, energy consumption, and material life cycle, supporting the development of environmentally friendly projects .
- AI and generative design can optimize designs in terms of energy efficiency, use of renewable energy sources, and the use of sustainable materials .
- Digital twins of cities , like the one in Uppsala, are used to plan sustainable urban models, protect biodiversity and reduce carbon emissions .
- IoT facilitates efficient energy management (smart grids, smart lighting), monitoring air and water quality, and reducing environmental impacts by optimizing resource use.

Improving Safety and Resilience

Digital technologies make significant contributions to disaster preparedness and response, infrastructure resilience and public safety.

- DTCs are used for fire safety management and flood forecast monitoring (Incheon), as well as for disaster preparedness, including storm surge modeling (Grenada).
- IoT sensors can detect floods, fires and other hazards, providing early warning, and monitor the health and load levels of critical infrastructure, supporting its predictive maintenance.
- BIM and cloud platforms help to plan and build buildings and structures that are more resilient to climate and man-made impacts.

Creating comfortable, inclusive and livable cities

Technologies have the potential to significantly improve citizen engagement, accessibility of the urban environment for all population groups, and the overall quality of urban life.

- VR and AR make the planning process more inclusive and understandable, improving the quality and effectiveness of public participation.
- URBANAGE project demonstrates how DTC and IoT can be used to identify accessibility issues and co-design more inclusive cities with older people.
- IoT can improve interactions with citizens through digital platforms and optimize the quality of public services (transportation, waste disposal), directly improving the quality of life.
- AI can help in analyzing the needs of different social groups, and design based on it can be oriented towards human-centered concepts, health, safety and comfort.

The true potential for sustainable development lies not in the isolated application of these technologies, but in their synergistic integration. For example, IoT data feeds DTC, which is analyzed by AI, visualized through VR/AR, and managed together via cloud platforms to achieve integrated results. A holistic, systems-based approach to

their deployment is therefore critical, and should be embedded in broader city strategies that consider human behavior, economic incentives, and policy frameworks.

Conclusion to Chapter 4

Conducted within the framework of this section monographs complex analysis indicates that digital technology is not just a complement or optimize existing urban practices planning and construction, and fundamentally their transform, opening the way to creation more intelligent, sustainable and people - oriented urban Wednesday. Evolutionary path from information modeling individual buildings (BIM) to multifunctional, real-life time Digital doubles cities (DTC), enhanced opportunities artificial intelligence, ubiquitous penetration Internet things, immersive experience virtual and augmented reality and supported global cloud platforms, is dominant a trend that will determine development industries for decades to come.

This transformation inevitably leads to a rethinking of the role and competencies of the urban planner himself, predominantly main designer who creates static plan, he turns into a conductor complex informational streams, interdisciplinary coordinator cooperation and that It is important, ethical navigator in a complex, rich data in the world. Ability critically evaluate quality and completeness data, understand limitations and possibilities algorithms, as well as effectively interact with a wide range of technologies and stakeholders sides becomes key professional competence.

Integration considered technology certainly has huge potential for creation more ecologically clean, resource-efficient, safe, resilient, fair and livable cities. However, it is important to avoid traps technological determinism . Technologies themselves are neutral and do not guarantee positive results; their final impact on the city environment and society is determined by how They are designed, implemented, managed and, most importantly, by whom are controlled.

Successful and beneficial for society integration these advanced digital technologies in the city Planning is not just a technical task, it is a complex one. sociotechnical task. It requires joint, synchronous evolution the technologies, structures and methods themselves management, professional practices, educational programs and public understanding and acceptance. Issues related to ethics,

management data, provision privacy, bridging the digital divide and the need adaptations professional skills, require a comprehensive, interdisciplinary approach. Purely technocentric. a look of disregard social, economic and political aspects, rather everything will endure failure or will result in unintended negative consequences such as gain social control or aggravation inequalities.

Convergence Digital doubles cities, advanced (AI- driven) simulation, immersive VR/AR interfaces and permanent cloudy environment for collaboration works indicates a gradual formation his own genus «urban metaverse» — a stable, common , virtual analogue of the physical city used for planning, design, operation and social interactions . This «urban metaverse» may become mainstream interface for many types activities in the field urban planning and management, that will have deep consequences for work professionals and interactions citizens with development their cities.

For implementation positive potential digital transformations are necessary proactive formation adequate regulatory and legal bases, development professional ethical codes and implementation inclusive approaches that ensure that these powerful tools serve public good. Further scientific research should be aimed at studying long-term social consequences ubiquitous implementations urban technologies, development new models of digital city management and search effective strategies overcoming the digital divide in the context of "smart cities". Only if the these conditions can will ensure that digital the future of our cities it was not only technologically advanced, but also humane, fair and genuine sustainable.

2.2 Adaptive hospitality design in heritage buildings: strategies for contemporary use

In modern architectural practice, the trend of turning to the existing architectural environment, in particular to historical buildings that have lost their original function or are in a neglected state, is becoming increasingly noticeable. In the context of urban transformation, the development of sustainable strategies and the growth of the tourist potential of cities, architects are increasingly working not with a “blank slate”, but with the material heritage of past centuries. In this context, the concept of revitalization is gaining particular relevance - a process that involves not only the physical restoration of an architectural object, but also giving it a new function.

Unlike restoration, which seeks to preserve the authenticity of forms and materials, revitalization involves rethinking the building in a modern context, as well as integrating new user needs. One of the promising areas in this area is the adaptation of historical objects to hotel functions. This approach allows not only to preserve valuable examples of architecture, but also to make them economically feasible, ensuring the sustainable development of cultural space.

The typology of historical buildings that can be adapted as hotels is extremely diverse. Among them, castles stand out - massive, often defensive structures with a unique historical and landscape context. Their transformation into hotels is usually aimed at the elite tourist segment, as it requires significant financial and technical resources. Another type is palaces, which come from an aristocratic environment and have rich decor, a ceremonial structure and clear zoning. Palace hotels are now actively operating in France, Italy, and Austria, giving guests the opportunity to "touch history" in the literal sense.

A separate category is made up of city mansions that emerged in the second half of the 19th and early 20th centuries as residential buildings for wealthy families. Their compact size and convenient location in the city make them suitable for conversion into boutique hotels. This group also includes commercial buildings typical of urban

development in large cities in Ukraine, Poland, Lithuania, and other Central and Eastern European countries. Such buildings, often with large apartments, can be adapted as apart-hotels or middle-class hotels, which allows preserving both the architectural shell and some interior elements.

Monasteries, former churches, and other sacred buildings are no less interesting from the point of view of revitalization. Their transformation requires a delicate approach, taking into account cultural and religious sensitivity, but examples of successful adaptation, such as the conversion of monastery cells into hotel rooms, prove the potential of such facilities in the context of tourism.

However, any intervention in historical architecture, especially when it comes to changing its function, is impossible without taking into account legal aspects. In many countries, including Ukraine, objects that have the status of architectural monuments are protected by the state, which imposes a number of obligations on designers and developers. In particular, all work must be coordinated with the relevant cultural heritage protection authorities, and even the smallest changes - such as replacing windows, reconstructing the roof or redeveloping interior spaces - require special permits. This process involves an expert examination of the project, drawing up a historical and architectural reference plan, as well as coordination with local government bodies. In this sense, an architect working with revitalization appears not only as a designer, but also as a mediator between the past and the present, between cultural heritage and market mechanisms. His task is not simply to "adapt" an old building to a new function, but to do it in such a way that it does not lose its identity, but on the contrary - gets a second life. And it is the hotel, as a public and open space, that in this case becomes an extremely apt function: it allows you to attract a wide audience to history, to make architecture not only visible, but also tangible - through space, material, light and time.

Designing a hotel within a historic building is always a game on the edge of the possible. On the one hand, there are clear requirements for comfort, engineering, and safety, which a modern hotel guest is accustomed to. On the other hand, the architect finds himself in a situation where he needs to combine the incompatible — to fit the

modern into the old without destroying its character. One of the biggest problems is the integration of engineering networks. A hotel building needs ventilation, air conditioning, water supply, sewage, elevator shafts, fire protection systems, etc. And all this infrastructure must work flawlessly, remaining as inconspicuous as possible — especially when it comes to interiors that have historical or decorative value. It is often impossible to lay communications in the usual ways: ceilings — wooden or brick vaults, load-bearing walls 80 cm thick, ceilings — under 4 meters and higher, windows — arched, or with colored stained glass. This is not an environment where every opening can become a problem at the level of monument protection legislation.

The next level of complexity is preserving authenticity, where all historical details must coexist with modern hotel comfort - with a bathroom in each room, with a level of noise insulation, with inclusivity. Often you have to work not just with old architecture, but with its constructive specificity. For example, high ceilings on the one hand are an advantage, on the other - difficulties in heating, lighting and sound insulation. Or the lack of a typical layout - in old mansions or palaces, rooms often do not have a regular grid, but "flow" into each other, losing clear functional zoning. This is great from a space perspective, but causes serious difficulties when placing identical rooms or distributing service areas. It often turns out that one room is perfectly suited for a suite, and the other is too narrow even for a standard single room, and all this within the same floor.

In addition, modern regulations require taking into account inclusiveness. And here again the architect is forced to look for compromises: how to integrate an elevator if the staircase is too narrow, and in the building it is strictly forbidden to demolish the ceilings? How to make an inclined ramp at the entrance if the facade is guarded and has marble decoration from the 19th century? Similarly - with fire safety: evacuation exits, sensors, fire-resistant doors, fire dampers - all this must be included without violating the aesthetics and without affecting authentic elements.

That is why the adaptation of historical buildings as hotels is never standard. There are no templates or ready-made solutions. Each object is a separate study, a set of challenges and a kind of architectural diplomacy. It is a constant dialogue between

preservation and functionality, between new comfort and old character. And this is precisely the main value of such design: it teaches to respect space and work with it as a living, informal environment.

When an architect takes on the task of designing in a historical environment - especially when it comes to creating a hotel, where functionality should be as saturated as possible - the first thing that should come to mind is not the layout of rooms, but a sense of tact. Because you are not working with a blank sheet of paper, but with an object that already has its own value, its own language, its own history.

One of the fundamental principles is minimal intervention. This means that any changes - even those that are absolutely necessary for the functioning of the hotel - should be implemented carefully, without destroying what can be preserved.

Another important principle is the reversibility of changes. That is, each new insert, partition, design element or engineering should be made in such a way that in the future they can be dismantled without harming the original structure. In a nutshell, a new hotel room in a monastery's cells should exist as a time capsule that can be cleaned up and the building left "clean" again. This approach is important from both an ethical and technical perspective: it preserves the possibility for future generations to see the building closer to its original state.

Another question that often causes discussion is contrast or stylization? Should a new element "disguise" itself as old architecture, or vice versa, clearly differ, showing the boundary between eras? Both approaches have the right to life, and both have their brilliant examples. Contrast is, for example, the insertion of a modern glass volume into the courtyard of a medieval palace, which is read as a separate, autonomous story. Stylization is, on the contrary, an attempt to "fit in" so delicately that the new is not read as an intervention. The main thing is not to falsify, not to "fake" the old, but to preserve the integrity of the material and idea. And here it is worth mentioning the newest materials that are increasingly used in historical environments - glass, steel, sometimes even polycarbonate or corten. Their advantage is in lightness, manufacturability, transparency or expressive texture. If done correctly, they do not conflict with antiquity, but on the contrary - emphasize it. One example is the Hotel

Castell d'Empordà in Spain, where a transparent glass gallery acts as a transition between parts of a medieval castle, without touching the stone walls and almost "disappearing" into space. Another is Das Stue in Berlin, where the historic neoclassical facade of the 1930s is complemented by light interiors made of steel, brass and glass, and there is no dissonance between eras.

All this confirms a simple idea: architectural intervention can be sensitive, but at the same time modern. Not to copy the past, but to engage in a dialogue with it - honestly, consciously, with respect. This is how real hotels are born in historic buildings: those that do not just rent out rooms, but tell stories.

One of the most interesting tasks facing an architect working with a historic building as a hotel is to create comfort in a space that, by and large, was not intended for this. In such cases, ergonomics becomes an art. Often, creative solutions have to be used: for example, building bathrooms into deep niches or placing shower cabins in closets. The layout of the rooms turns out to be non-standard, but unique. The main thing is not to go against the logic of space, but to work with it, adjusting the function to the form, and not the other way around. As a result, the guest gets an experience that cannot be recreated in a typical hotel: it is a different geometry, a different atmosphere, a different sense of space.

Interior design plays a big role here, because it is responsible for preserving the spirit of the era. It is important that the interiors retain something of the authenticity that makes the building unique. This is the preservation or even emphasis of authentic elements - such as stucco molding, ancient mosaics, wooden floors, shutters, old furniture. These elements can "work" in dialogue with modern details - lighting, textiles, new partitions. If everything is done delicately, the old and the new do not conflict, but form a living, harmonious composition. As for functional zoning, a special approach is also needed here. For example, it is not always possible to create a large lobby - then part of the living room of the former mansion performs its function. Or the SPA is placed in the dungeon of the monastery - and this is not only an effective use of space, but also the creation of a unique atmosphere. Restaurants are often set up in old dining rooms, banquet halls or conservatories, preserving high ceilings, tiled

stoves or authentic fireplaces. Lounge areas can be located in former libraries or winter gardens - and this is what gives hotels character.

An example of such zoning is the Palacio de los Patos hotel in Granada, Spain: a historic palace has been converted into a hotel, where the lounge is a former hall with marble columns, and the restaurant is in an enfilade space with painted ceilings. Or the Hotel Pulitzer in Paris, where the ancient structure is combined with a new minimalist design, without violating either the layout or the spirit of the building.

The Hôtel de Crillon is, without exaggeration, a benchmark for adapting historical architecture to modern hotel functions. Located on the Place de la Concorde in the heart of Paris, this building was built in 1758 by architect Jacques-Ange Gabriel as part of an ensemble of royal administrative buildings. Its history alone sets the tone - Marie Antoinette, Napoleon, and American ambassadors have visited here in their time. In 1909, the Crillon first became a hotel, but its real architectural transformation began only in the 21st century.

The restoration and transformation of the Hôtel de Crillon into a luxury hotel took several years (2009–2017). The main challenge was to combine the extremely refined heritage of the 18th century with the highest standards of hotel comfort of the 21st century. All technical networks were completely updated, ventilation and air conditioning systems were installed, and modern elevators were integrated, without disturbing either the decor or the spatial logic.

The work with the interiors was particularly difficult: authentic ceilings, carvings, parquet, stone portals - all this was restored by hand, with the participation of masters of stone, wood, and fabrics. At the same time, modern design solutions appeared in the rooms and recreation areas that do not compete with history, but only emphasize it.

Today, the Crillon is not just a hotel, but a demonstration of how careful, skillful intervention can breathe new life into an old structure without destroying its authenticity. And this is exactly the case when the architecture of the past and the present find a common language.

The Gritti Palace is another impressive example of how a historical building can be adapted to modern hotel functions without losing its cultural value. The palace was built in the 15th century as a private residence for the family of Doge Andrea Gritti and is located right on the Grand Canal, overlooking the church of Santa Maria della Salute. The location itself already suggests that this is not just a building - it is part of the historical heart of Venice.

In the 21st century, the palace was converted into a luxury hotel, which also functions as a museum. It is a very fine line - to make a comfortable hotel and at the same time not to lose the museum value of the interiors. The Gritti Palace managed to withstand it. Ancient frescoes, handmade wooden ceilings, tapestries, Renaissance furniture have been preserved here - all this not only decorates the premises, but also sets the tone for the entire space.

But behind this beauty lies a very serious architectural work. For example, each room has a modern bathroom, climate control system, electronic locks, and none of these elements fall out of the overall style.

The system of engineering networks required special attention - due to the limitations associated with the humid Venetian climate and old structures.

As a result, The Gritti Palace became a symbol of how you can live inside history - in the literal sense. This is not just a hotel in an old building. This is a hotel where the building itself is the main character, and modern comfort is just a tool to make this history accessible to the guest.

11 Mirrors Design Hotel is an interesting case of a modern interpretation of hotel space in a historical urban environment. Located in the center of Kyiv, near the Opera House and St. Volodymyr's Cathedral, the hotel occupies one of the typical buildings of the early 20th century. Although the building itself is not a monument of national architectural significance, its context is the classic Kyiv modern and eclecticism that shape the face of the historical center.

Against this background, 11 Mirrors works as a contrast. This is an example where the architects did not seek to stylize in the style of antiquity, but on the contrary - created a very modern, almost futuristic interior. The author's design is built on clean

lines, mirror surfaces, minimalist forms. The name "11 Mirrors" is not accidental - mirrors here are not just a decor, but a functional element of space, which blurs the boundaries and creates a feeling of lightness even in quite compact rooms. In this case, the preservation of the historical facade is combined with a complete reconstruction of the interior space. This allowed the integration of modern technologies without the strict restrictions that are usually found in architectural monuments. At the same time, the hotel does not fall out of the urban context - its discreet facade does not conflict with the surroundings, and the contrast is felt only when you go inside.

Hotel Indigo is an example of a network approach to adapting historic buildings, but with an unexpected respect for local context for hotel chains. There are several such hotels in London (for example, in the areas of Kensington, Paddington, Tower Hill), and each of them is located in buildings of historical significance - from Victorian and Edwardian townhouses to former banks or post offices.

The philosophy of Hotel Indigo is built on the principle of "locality through design". This means that each hotel does not just operate in a historic building - it tells the story of the area through its architecture and interior. For example, at Hotel Indigo Kensington, the interiors are stylized as 19th-century English offices with modern accents, and at Hotel Indigo London Paddington, the space is built around the theme of rail travel, which has shaped the area for centuries.

Hotel Indigo shows how a network approach does not necessarily mean standardization. In this case, architects and designers create not just comfortable hotels in old buildings - they convey the spirit of the place, allowing the visitor to feel not just in a hotel, but in an urban context that has its own depth and character.

Hotels located in historical buildings have a significant impact on the urban environment and cultural heritage of cities. They increase the tourist attractiveness of cities, provide guests with the opportunity to experience a unique atmosphere that is impossible in ordinary modern buildings - this is direct contact with history through the space itself. Staying in an old palace, castle or mansion becomes not only comfortable, but also a unique, memorable experience. This is important for tourists,

because it forms an emotional connection with the city and stimulates the desire to return again.

The second important aspect is the actualization of forgotten or neglected historical buildings. In many cities around the world, old buildings have been lying vacant or inefficiently used for years, leading to their gradual deterioration. Investing in converting such facilities into hotels is often a way to save them from destruction. Reconstruction and revitalization restore buildings to their function and significance, which in turn helps preserve the integrity of the city's historic environment. Another positive effect is the stimulation of the development of surrounding areas: improving infrastructure, increasing the number of jobs, and developing small businesses - cafes, restaurants, and souvenir shops.

Another important point is an example of effective synergy between business and cultural heritage protection. In this cooperation, each party receives its benefits. Business is the opportunity to create a unique product that differs from typical hotels, due to the authenticity of space and history. For owners and investors, this is a competitive advantage in the tourism services market. On the other hand, the preservation of historical buildings is ensured precisely thanks to the financial resources of business, which go to the restoration, maintenance and adaptation of buildings. This is an effective model of sustainable development, where economic activity does not destroy, but on the contrary, supports cultural heritage. Thus, hotels in historical buildings are an important socio-cultural phenomenon that helps preserve and transmit cultural values, increases the attractiveness of cities and contributes to their development in the face of modern challenges.

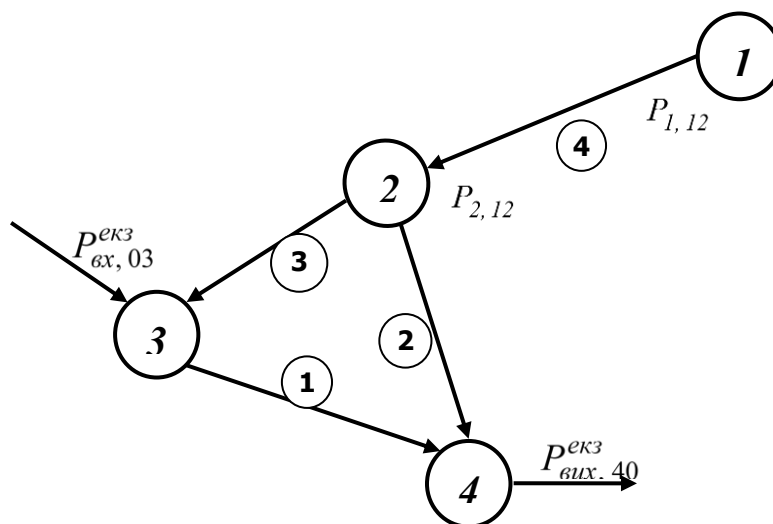
SECTION 3. ENERGY

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.3.1

3.1 Method of mapping the topology of interconnected networks into the structure of the technological matrix of the production-type model

Колективні проекти паливозабезпечення передбачають розгляд системи паливозабезпечення як системи виробництв з видобутку паливних продуктів, їх перетворення та транспортування [102-119]. Вказані об'єкти є взаємозалежними елементами системи, створення яких слід розглядати як процес у часовому аспекті, що передбачає аналіз варіантів у економічному та безпековому аспектах протягом всього періоду функціонування. Ці положення окреслюють вимоги до моделей системи паливозабезпечення, які відповідають наявним викликам економічної та енергетичної безпеки.

Розглянемо мережу системи вироблення, транспортування-розподілу, споживання паливного продукту – вугілля, природного газу, нафти тощо, фрагмент графа якої зображено на мал. 1.



Малюнок 1. Граф мережі

Граф мережі складається з вузлів та ребер. Вважаємо потокорозподіл мережі визначеним, якщо для вузлів задаються величини вироблення, P_{θ} , споживання, P_c , вхідний та вихідний зовнішні, екзогенні потоки продукту, $P_{вх, 0i}^{екз}$ і $P_{вих, i0}^{екз}$

відповідно, табл. 1, для ребер – напрямок потоку продукту і його величини на початку — $P_{ij,i}$ та в кінці ребра — $P_{ij,j}$, на мал. 1 — $P_{12,1}$ і $P_{12,2}$, відповідно.

Таблиця 1.

Вузли мережі

Вузол	Тип вузла	P_{ϕ}	P_c	$P_{\phi,0i}^{екз}$	$P_{\phi,0i}^{екз}$
1	Вироблення	$P_{\phi,1}$	0	0	0
2	Споживання	0	$P_{c,2}$	0	0
3	Споживання	0	$P_{c,3}$	$P_{\phi,03}^{екз}$	0
4	Споживання	0	$P_{c,4}$		$P_{\phi,40}^{екз}$

Параметри поточкорозподілу задовольняють систему рівнянь балансу потоків продукту у вузлах мережі

$$\sum_{i'} P_{i'j,j} - \sum_{i''} P_{i''j,j} = (P_{c,j} - P_{\phi,j}) - \left(\sum_{k'} P_{\phi,k'j}^{екз} - \sum_{k''} P_{\phi,jk''}^{екз} \right), \quad j = \overline{1, N} \quad (1)$$

де індекси i' та i'' належать до множин вхідних та вихідних потоків вузла j , а k' і k'' – вхідних та вихідних екзогенних потоків, відповідно.

Записи правих частин рівнянь (1) для прикладу графа мережі на мал. 1 подані в табл. 2.

Таблиця 2.

Права частина системи рівнянь балансу продуктів у вузлах

Вузол	Права частина (RHS)
1	$-P_{\phi,1}$
2	$P_{c,2}$
3	$P_{c,3} - P_{\phi,03}^{екз}$
4	$P_{c,4} + P_{\phi,40}^{екз}$

Модель виробничого типу [120] системи паливозабезпечення, потокова модель якої подана на рис. 1, будується шляхом 1) визначення множини її продуктів через змінні потокової моделі і 2) зв'язування обсягів продуктів технологічними коефіцієнтами витрат і втрат.

Продуктами, що виробляються в моделі виробничого типу системи паливозабезпечення, яка подається графом потокової моделі, зображеної на

мал. 1, будемо вважати

1) загальне надходження палива у вузол – алгебраїчну суму обсягів власного виробітку вузла, вхідних потоків з приєднаних ребер та вхідних екзогенних потоків

$$X_j^+ = P_{в,j} + \sum_{i'} P_{вх,i'j} + \sum_{k'} P_{вх,k'j}^{екз}; \quad (2)$$

2) загальний вихідний потік вузла – алгебраїчну суму обсягів споживання, вихідних потоків в приєднані ребра та вихідних екзогенних потоків

$$X_j^- = P_{с,j} + \sum_{i''} P_{вих,i''j} + \sum_{k''} P_{вих,k''j}^{екз}; \quad (3)$$

3) вхідний потік палива ребра

$$Y_{i'}^+ = P_{вх,i'j}; \quad (4)$$

4) вихідний потік палива ребра

$$Y_{i''}^- = P_{вих,i''j}; \quad (5)$$

Тоді технологічні коефіцієнти, що за змістом є коефіцієнтами втрат та витрат продуктів у технологічному способі, природно визначити наступним чином. Технологічний коефіцієнт ребра k , з початком у вузлі i і кінцем у вузлі j дорівнює відносним втратам продукту в ребрі k :

$$g_{lm} = \frac{P_{вих,ij} - P_{вх,ij}}{P_{вх,ij}}, \quad (6)$$

де індекси l та m вказують позицію технологічного коефіцієнта вироблення основного продукту ребра k в технологічній матриці моделі.

Аналогічно технологічним коефіцієнтом вузла j є відносні внутрішні втрати продукту в вузлі:

$$g_{lm} = \frac{\left(P_{в,j} + \sum_{k'} P_{вх,k'j}^{екз} \right) + \sum_{i'} P_{вх,i'j} - \left(P_{с,j} + \sum_{k''} P_{вих,k''j}^{екз} \right) - \sum_{i''} P_{вих,i''j}}{\left(P_{в,j} + \sum_{k'} P_{вх,k'j}^{екз} \right) + \sum_{i'} P_{вх,i'j}}. \quad (7)$$

Технологічна підсистема моделі виробничого типу утворюється шляхом подання балансових рівнянь (1) потокової моделі у змінних продуктів (2) — (5)

із врахуванням технологічних коефіцієнтів ребра та вузла – (6) і (7), відповідно.

Опишемо структуру технологічної матриці моделі виробничого типу, що відповідає даним вище визначенням основних продуктів техспособів. Вузол мережі представлено в технологічній матриці групою технологічних способів, табл. 3. Перший техспосіб групи забезпечує внутрішнє вироблення вузла та надходження вхідного екзогенного потоку, наприклад техспосіб 1 у групі вузла 1. Далі група вузла вміщує послідовність техспособів надходження у вузол потоків приєднаних ребер, наприклад техспособи записані у 2-му і 3-му стовпчиках групи вузла 4. Кількість таких техспособів дорівнює кількості ребер, потоки продукту в яких є вхідними для розглядуваного вузла. Останній техспосіб групи відповідає за вироблення повного потоку вузла із заданим технологічним коефіцієнтом втрат. Вказані техспособи кожної групи вузла разом утворюють підсумовувальну конструкцію для внутрішнього вироблення, екзогенного вхідного потоку та вхідних потоків приєднаних ребер. Вироблений у вузлі повний (сумарний) потік продукту розподіляється між техспособами ребер вихідних потоків з допомогою розподільних конструкцій. Далі вихідні потоки, вироблені в техспособах ребер, надходять у відповідні техспособи вузлів.

Таблиця 3.

Технологічна матриця моделі виробничого типу для графа мережі на рис. 1

Техспособи вузлів													Техспособи ребер				Права частина					
Вузол													Ребро									
													1	2	3	4						
Вузол	1	1	-1																0			
	2		1	1	-1											-1	-1		0			
	3				0,96														0			
	4																		0			
Ребро	1																		$P_{c,2}$			
	2																		0			
	3																		$P_{c,3}$			
	4																		0			
																						$P_{c,4} + P_{вих,40}^{екз}$
	1																		0			
	2																		0			
	3																		0			
	4																		0			

$P_{в,1}$	0	$P_{вх,03}^{екз}$	0	
$P_{в,1}$	0	$P_{вх,03}^{екз}$	0	

Рівняння балансу потоків продукту у вузлі, згідно з порядком доданків за структурою моделі має вигляд:

$$(1 - g_{lm}) \cdot \left(\left(P_{e,j} + \sum_{k'} P_{ex,k'j}^{екз} \right) + \sum_{i'} P_{ex,i'j} \right) - \sum_{i''} P_{vix,ji'',j} - \sum_{k''} P_{vix,jk''}^{екз} = P_{c,j} \quad (8)$$

Структуру технологічної матриці моделі виробничого типу із врахуванням допоміжної підсистеми, що забезпечує різноманітні обмеження на інтенсивності технологічних способів виробітку описаних вище потокових продуктів, подано в табл. 4.

Таблиця 4.

Структура технологічної матриці системи рівнянь балансу моделі
паливозабезпечення із врахуванням допоміжної підсистеми

<i>I. Техспособи вузлів</i>	<i>II. Техспособи ребер</i>
Блок I вироблення сумарного вихідного потоку вузла	Блок II розподілу вихідного потоку вузла та його споживання ребрами
Блок IV споживання вузлом вихідних потоків ребер	Блок III вироблення вихідних потоків ребер
Підсистема додаткових рівнянь моделі:	Блок V функціональних обмежень на змінні обсяги потоків палив

Необхідною умовою підтримки функціонально-здатної багатопродуктової моделі паливозабезпечення країни є забезпечення її властивості адаптуватися до наявного інформаційного забезпечення. Тому в розроблюваній моделі здійснено спробу запровадити гнучкі динамічні механізми зміни або корекції її структури згідно з обсягом та рівнем деталізації наявної вихідної інформації, які можуть змінюватися в процесі вдосконалення моделі. Ці механізми базуються на можливостях, що виникають при застосуванні мережних аналогій та властивих мережним системам математичних абстракцій до подання технологічної структури системи паливозабезпечення.

Зокрема, укрупненню рівня опису системи паливозабезпечення відповідає підсумовувальна конструкція вузла графа мережі постачання палива, що містить декілька вхідних потоків і один вихідний і навпаки, деталізації – вузол з переважно розподільною конструкцією, тобто одним вхідним потоком і

декількома вихідними. Перетворення множини вхідних продуктів в множину вихідних у загальному випадку здійснюється у вузлі загального вигляду з m вхідними та n вихідними потоками, де $m, n > 1$. Такі структурні конструкції технологічної матриці дозволяють, наприклад, розширювати асортиментний склад продуктів системи паливозабезпечення в технологічних ділянках, що потребують деталізованого їх врахування, і навпаки, об'єднувати асортиментні складові для етапів перетворення, що зазвичай характеризуються підсумковими показниками. Типовими прикладами застосування цих структурних компонентів моделі є розподіл вугільної продукції за марками при споживанні в енергетиці й металургійній галузі і, відповідно, оцінка обсягів перевантаження в портах призначення імпорту.

Засоби опису всіх необхідних видів перетворення палив та паливних продуктів, включно з їх виробітком і проміжним споживанням забезпечуються в моделі внутрішньою структурою техспособів конструктивних елементів вузла і лінії – елементів графа уявної мережі, що співставляється системі паливозабезпечення. Ці конструктивні елементи [121] містять техспособи власного виробітку вузла, техспособи надходження продуктів із суміжних вузлів, виробітку сумарного продукту вузла та його розподілу між приєднаними лініями.

Дотримання необхідних фіксованих співвідношень між обсягами продуктів забезпечується різними формами підсистем пропорціонування потокових змінних моделі в ребрах графа асоційованої мережі.

Застосування підходу мережних аналогій із застосуванням вказаних вище модельних конструкцій дозволяє розробляти моделі окремих технологічних та продуктових підсистем паливозабезпечення з метою їх наступного включення в загальну модель системи.

З метою систематизації та визначення переліку продуктів моделі паливозабезпечення доцільно ввести поняття первинних палив, паливних продуктів та модельних паливних продуктів.

Модельний паливний продукт являє собою математичну абстракцію, що позначається парою імен — власне паливного продукту та технології його виробництва. Одному фізичному паливному продукту співставляється множина модельних паливних продуктів, що утворюються у всіх технологіях його виробництва.

Необхідність врахування економічно та технологічно виокремлених схем паливозабезпечення породжує вимогу запровадження в моделі однопроводових підсистем постачання паливних продуктів. Необхідність розгляду таких схем впливає з вимог:

- перелічити та поіменувати всіх споживачів кожного виду палива;
- виявити та виділити повні технологічні ланцюги кожного окремого виду палива від його виробітку до кінцевого споживання;
- виділити фізично однакові модельні паливні продукти, що відрізняються своїми повними технологічними ланцюгами через позаекономічні чинники — політичні, соціальні, інтереси приватного сектора економіки тощо.

Виходячи з цього видається доцільним будувати технологічний граф багатопроводової системи паливозабезпечення шляхом з'єднання елементарних технологічних ланцюгів паливних продуктів у вузлах виробітку, споживання або взаємного перетворення відповідних модельних продуктів.

3.2 Strategic trading in brent oil: evaluating the profitability of contrarian technical approaches

The European Union started the process of bringing competition to the European natural gas market almost twenty years ago. The organization and coordination of the gas market, as well as the participation of various actors, underwent substantial changes as a result. The restructuring process is still in progress as of mid-2016. There is a prevalent belief that the market requires more development, which leads to the frequent release of new laws, guidelines, and interventions. At first, the market restructuring process's delays were blamed for the issues. The efficient operation of the EU gas market was impeded by producers, wholesale, and retail companies using their market power. In north-west Europe, supplier competition has grown the most, while other regions continue to rely on a single [122].

Crude oil market volatility remains a central concern for investors, policymakers, and industry stakeholders worldwide. This volatility arises from a complex interplay of factors, including geopolitical instability, macroeconomic trends, and imbalances in global supply and demand. Given crude oil's foundational role in the global economy—impacting everything from energy pricing to transportation and goods—understanding and managing this volatility is essential for effective decision-making and risk management.

To navigate the uncertainty inherent in oil markets, investors frequently turn to technical analysis and rule-based trading strategies. These methods leverage historical price data to generate insights about market behavior and guide entry and exit decisions. Among the most commonly used tools in this domain are the Relative Strength Index (RSI) and the Stochastic Oscillator Indicator (SOI), which are designed to detect overbought and oversold conditions. These indicators are particularly valuable in contrarian investment strategies, which seek to capitalize on temporary market overreactions and price overshooting—situations where prices deviate significantly from their fundamental values. When such deviations occur, they often

revert to mean levels, offering profitable opportunities for well-timed trades. Momentum-based strategies, in contrast, aim to exploit continuing price trends. Technical trading rules based on moving average (MA) crossovers are often used to signal trend direction and determine optimal points for entering or exiting the market. These rules support trend-following behavior by identifying sustained price movements and allowing investors to align with dominant market directions.

The utility of technical analysis in oil markets has been extensively supported in academic literature and by financial information platforms such as Bloomberg, Investing.com, and MarketWatch. These sources offer real-time technical insights, further reinforcing the widespread reliance on such tools in navigating oil price fluctuations. However, much of the existing research on contrarian and momentum strategies relies on static thresholds and does not adequately account for seasonal patterns or behavioral biases such as herding and imitation.

Investor sentiment and social influence can significantly impact oil price dynamics, especially in volatile conditions. Herding behavior—where market participants mimic the actions of others to mitigate uncertainty or avoid losses—often results from asymmetric information and the fear of missing out on profitable trades. These behavioral dynamics can amplify price movements and distort technical signals, reducing the efficacy of rigid, rule-based approaches. Consequently, there is a growing need for adaptive trading strategies that respond dynamically to changing market conditions. Another important consideration in assessing the effectiveness of trading strategies is performance evaluation. Key performance metrics include the Average Holding Period Return (AHPR), which measures the average return across multiple trades; the Sharpe Ratio, which evaluates risk-adjusted returns; Maximum Drawdown (MDD), reflecting the largest loss from peak to trough; and various learning-based metrics that assess model generalization and return consistency. Among these, AHPR is particularly suitable for evaluating technical trading strategies, as it offers a comprehensive view of returns across different signals and holding durations.

This study addresses key gaps in the literature by incorporating big data analytics to dynamically adjust the parameters of RSI and SOI indicators. It also evaluates their

seasonal performance using the AHP metric. By tailoring the technical rules to different market conditions and seasonal cycles, the analysis aims to improve trading outcomes and provide a more robust framework for decision-making in crude oil markets. Furthermore, the study challenges the assumptions of the Efficient Market Hypothesis by demonstrating that rule-based strategies—especially those adapted in real-time—can yield superior performance in volatile environments.

In sum, this research contributes to the growing body of evidence supporting the application of technical analysis in commodity markets. It highlights the importance of adaptive, data-driven strategies that consider both behavioral and seasonal factors in enhancing investment performance in the highly dynamic crude oil market. This study focuses on evaluating the performance of contrarian technical trading strategies in the Brent crude oil market, with a particular emphasis on rules derived from the Relative Strength Index (RSI) and the Stochastic Oscillator Indicator (SOI). These indicators are widely used to identify overbought and oversold market conditions, which often precede price corrections or reversals. In technical analysis, overbought signals typically occur when the RSI exceeds a value of 70 or the SOI's line rises above 80, suggesting that the asset may be overvalued and a price decline could be imminent. Conversely, oversold conditions arise when the RSI drops below 30 or the SOI falls under 20, indicating that the asset may be undervalued and a price recovery is likely. These thresholds have become standard benchmarks in traditional technical trading approaches. However, the fixed nature of these thresholds has been increasingly scrutinized in light of market complexity and the growing availability of real-time data. As a response, this research explores whether dynamically adjusting these parameters using big data analytics can lead to more effective trading signals and superior performance. By applying adaptive RSI and SOI thresholds to historical Brent crude oil data, the study aims to measure not only the profitability of these strategies but also their utility as risk management tools under volatile market conditions. The empirical findings suggest that such flexibility enhances the responsiveness of trading rules to shifting market dynamics, improving decision-making accuracy for investors operating in energy markets.

A key innovation of this research lies in the integration of adaptive parameter settings with seasonally informed trading strategies. In contrast to previous studies that rely on static rules, this study introduces a dynamic framework that recalibrates RSI and SOI thresholds in alignment with seasonal patterns and market regimes. For instance, evidence from the analysis indicates that employing a lower RSI threshold (e.g., RSI25) during certain quarters—such as Q2 for oversold detection—produces more favorable entry points, while higher thresholds (e.g., RSI75) are more effective for signaling overbought conditions. This adaptive methodology not only improves timing accuracy but also enhances risk-adjusted returns, particularly in environments marked by frequent overreactions and price volatility.

To assess the effectiveness of these contrarian strategies, the study employs the Average Holding Period Return (AHPR) as the primary evaluation metric. AHPR offers a nuanced and time-sensitive measure of performance by capturing the average return across various trading signals and holding periods. This metric is especially valuable in the context of seasonally adjusted strategies, where profitability may vary significantly across different times of the year. The results demonstrate that strategies incorporating flexible RSI thresholds tend to outperform those based on SOI rules—particularly under overbought conditions—underscoring the importance of selecting and optimizing technical indicators in relation to market behavior.

Furthermore, the study contributes to the broader technical analysis literature by providing robust, data-driven evidence on the advantages of abandoning one-size-fits-all trading rules in favor of more adaptive frameworks. By highlighting the superior performance of the RSI75-based contrarian strategy under certain market conditions, the research emphasizes the critical role of contextual parameter tuning in boosting return potential. The results also affirm the notion that trading strategies grounded in market psychology and behavioral finance—such as exploiting price overshooting due to investor overreaction—can be significantly enhanced through data analytics and adaptive model design.

Ultimately, this study offers several important contributions to both academic research and practical investment strategy development. First, it pioneers the use of big

data techniques to dynamically adjust technical indicator thresholds in the crude oil market. Second, it demonstrates the empirical effectiveness of integrating flexible parameters with seasonally optimized trading schedules. Third, it identifies the superior performance of certain RSI configurations—particularly under high-volatility scenarios—relative to conventional SOI-based rules. And fourth, it provides practical guidance for investors aiming to refine their technical strategies in energy markets. These findings not only challenge the prevailing reliance on static rules in technical trading but also underline the importance of adaptability and timing in generating sustained performance in a highly dynamic market environment.

Technical analysis presents a fundamental challenge to the Efficient Market Hypothesis (EMH) by suggesting that financial markets, including the oil market, do not always reflect all available information accurately or instantly. According to the EMH, prices follow a random walk and incorporate all relevant data, leaving no room for consistent excess returns. However, technical analysis is grounded in the belief that price movements are not purely stochastic but rather exhibit recurring patterns and trends shaped by investor sentiment, behavioral biases, and psychological responses—core themes in the field of behavioral finance [123].

These inefficiencies are particularly visible in commodity markets such as crude oil, where prices are heavily influenced by exogenous shocks, including geopolitical developments, economic sanctions, supply disruptions, and speculative trading behavior. In such environments, price deviations from intrinsic values are common, creating opportunities to identify trading signals through indicators that detect overextended price behavior. Overbought and oversold conditions, for instance, can act as precursors to trend reversals, allowing traders to deploy systematic, rule-based strategies that go beyond traditional fundamental valuation methods [124]. Empirical studies increasingly support the effectiveness of technical indicators such as moving averages and the Relative Strength Index (RSI), demonstrating that these tools can generate statistically significant returns in Brent and WTI futures trading. These findings suggest that persistent price anomalies exist within oil markets, undermining the strong-form version of the EMH, which asserts that market prices always reflect

their fair value based on available information. Thus, technical analysis contributes value not merely by offering heuristics but by systematically identifying and capitalizing on inefficiencies that arise due to human behavior, incomplete information dissemination, and irrational market dynamics.

Among the various strategies under the umbrella of technical analysis, contrarian trading holds a particularly interesting position. This approach involves taking investment positions contrary to prevailing market trends or sentiment, with the rationale that markets often overshoot due to investor overreaction or herd behavior. In oil markets, where prices are highly sensitive to unpredictable events such as OPEC announcements, regional conflicts, and macroeconomic shocks, contrarian strategies aim to exploit these behavioral inefficiencies. By relying on tools like the RSI and the Stochastic Oscillator Indicator (SOI), traders can detect market extremes and position themselves to benefit from subsequent corrections or reversals [125].

Recent literature highlights that contrarian strategies not only offer potential for abnormal returns but also serve as effective portfolio diversifiers, especially during periods of elevated volatility when trend-following or momentum-based strategies may falter [126]. However, the success of contrarian trading in oil markets requires more than mere signal interpretation—it demands a nuanced understanding of market sentiment and the ability to distinguish between temporary price dislocations and more structural shifts. Effective implementation hinges on the trader's capacity to assess whether current price movements reflect fundamental changes or speculative overreactions. By challenging prevailing market consensus, contrarian approaches offer a compelling alternative to conventional trading methods and provide a robust framework for managing uncertainty and capitalizing on inefficiencies inherent to oil markets. The Stochastic Oscillator Indicator (SOI) is a popular technical tool that helps identify momentum shifts and potential reversal points in asset pricing, including in the context of crude oil trading [127]. It compares the asset's closing price to its price range over a specific period—commonly nine or fourteen days—to produce values on a scale of 0 to 100. Readings above 80 generally indicate overbought conditions, while those below 20 suggest the market is oversold. These signals can be particularly useful

in volatile markets like oil, where prices frequently fluctuate due to both external and internal market pressures. The SOI thus enables traders to anticipate possible downturns or upswings and refine their trading strategies accordingly. Traders often integrate the SOI with other indicators to improve the reliability of trade entry and exit points, thereby enhancing the overall precision of short-term trades. Similarly, the Relative Strength Index (RSI) is a widely used momentum oscillator in technical analysis and has proven especially effective in volatile commodity markets such as oil. Calculated over a 14-day period, the RSI provides a normalized value between 0 and 100, allowing traders to easily interpret market conditions. An RSI reading above 70 is interpreted as a sign that the asset may be overbought, indicating a potential for downward correction. Conversely, an RSI below 30 typically suggests oversold conditions and a potential for upward movement. Given the frequency of price swings in oil markets, the RSI is particularly useful in capturing short-term trading opportunities and validating directional trends.

Importantly, both the RSI and SOI are most effective when used in conjunction with other indicators or within broader trading systems. Their ability to highlight key turning points in the market—especially when corroborated by other data—provides traders with a more informed and strategic basis for decision-making. The integration of these tools into contrarian strategies allows traders to systematically exploit price dislocations and navigate the inherent volatility of the oil market with greater confidence and precision [128].

In sum, technical analysis—particularly through tools like the RSI and SOI—offers a compelling framework for analyzing and trading in the crude oil market. By acknowledging and exploiting behavioral biases and market inefficiencies, it stands in contrast to the EMH and provides investors with actionable strategies for navigating the complexities of global energy markets.

The Stochastic Oscillator Indicator (SOI) and the Relative Strength Index (RSI) are widely used in technical analysis, each with distinct advantages. The SOI captures short-term price reversals by measuring recent closing prices relative to their high–low range, making it responsive in volatile markets like Brent crude. However, this

sensitivity often generates noise, requiring careful filtering. The RSI, on the other hand, offers a smoother signal by tracking average gains and losses over a set period—typically 14 days. With clear threshold levels (70 for overbought, 30 for oversold), it provides more stable momentum readings and is effective in identifying broader trend reversals, particularly in high-volatility environments. Unlike the SOI, the RSI better filters out noise, aiding more precise decision-making. This study underscores RSI's superior reliability in signaling reversals, forming the basis for Hypothesis 1 (H1).

Rule-based trading strategies, grounded in technical indicators, systematically identify mispricing caused by market sentiment and behavioral biases—contradicting the Efficient Market Hypothesis (EMH). In oil markets, strategies using oversold signals to initiate long positions and overbought signals to short offer structured methods to exploit price corrections. These strategies' strength lies in their responsiveness to momentum shifts and investor overreaction, potentially outperforming traditional approaches. This study enhances such systems by applying seasonal segmentation and refining indicator thresholds, resulting in a more adaptive framework. Hence, it proposes Hypothesis 2 (H2).

This study also explores the characteristics of adaptive contrarian trading, which recalibrates RSI thresholds dynamically using big data analytics. Unlike static strategies that rely on fixed levels (e.g., RSI 30/70), adaptive models adjust in real time to reflect changing market dynamics. This flexibility allows traders to align strategies with evolving sentiment, especially amid geopolitical uncertainty or macroeconomic shocks. Such adaptability improves precision and return potential, making contrarian signals more reliable under volatility. Thus, the study proposes Hypothesis 3 (H3).

By implementing contrarian strategies across different quarters, traders can better exploit cyclical inefficiencies and emotional price swings. Oil markets often experience temporary dislocations driven by seasonality, speculative behavior, and global events. Contrarian approaches that move against prevailing sentiment can uncover reversal points during periods of irrational exuberance or panic. A quarterly adaptive model improves entry timing and reduces exposure to herding behavior,

providing a robust framework for navigating cyclical volatility. Accordingly, this study proposes Hypothesis 4 (H4).

Finally, the research advances an adaptive trading model that adjusts parameters quarterly using big data analytics. This model accounts for the oil market's cyclical patterns and high sensitivity to external shocks. Unlike rigid systems, the adaptive approach tailors threshold values to the prevailing economic context, enhancing the accuracy of contrarian signals during uncertain or rapidly changing conditions. This innovation contributes a responsive, data-driven framework for oil trading strategies and forms the basis for Hypothesis 5 (H5).

This study integrates contrarian strategies based on technical indicators such as the Stochastic Oscillator (SOI) and the Relative Strength Index (RSI), aiming to exploit market inefficiencies and investor overreactions. In light of rising crude oil price volatility—driven by climate-related events and geopolitical shocks—investors may benefit from reallocating assets into oil-linked instruments like Brent oil ETFs, guided by contrarian signals [129].

We assess the profitability of RSI and SOI-based strategies across different quarters, focusing on oversold and overbought signals. Our analysis also emphasizes the importance of flexible thresholds, rather than strict adherence to traditional RSI/SOI values, to enhance trading performance.

H1: Empirical findings show that RSI and SOI perform similarly in identifying oversold conditions, capturing mean-reversion opportunities. However, for overbought conditions, the RSI at a 75 threshold outperforms other configurations, suggesting that higher thresholds better capture extended bullish trends. This partially supports H1, underscoring the need for adaptable thresholds to optimize contrarian strategies.

H2: Our results indicate that buying Brent oil ETFs on oversold signals is generally more profitable than short-selling on overbought signals. This diverges from prior research, aligning with Ni et al. [123], and highlights the context-dependent nature of technical strategies. The weaker performance of short positions may stem from sustained bullish momentum and external shocks, which delay reversals. Thus, H2 is supported for oversold cases, but not for overbought.

H3: Testing non-traditional thresholds (e.g., RSI25, RSI35, K15, K25), we find limited improvement for oversold signals, suggesting traditional values may suffice. In contrast, overbought strategies using RSI75 consistently outperform others, reinforcing the value of customized settings in bullish conditions. These findings support H3, illustrating the benefit of flexibility in volatile markets.

H4: Quarterly performance analysis shows Q2 outperforms other periods, particularly for RSI30 and SOI20 in oversold scenarios. However, overbought conditions show mixed results, with only RSI70 in Q1 standing out. This provides partial support for H4, affirming that timing and seasonal factors can significantly affect strategy outcomes.

H5: Combining timing and parameter adjustments yields substantial gains. For instance, RSI25 in Q2 achieves a 45% AHP250 under oversold conditions, while RSI75 in Q2 surpasses 22% under overbought conditions. These results support H5, confirming that dynamic timing and threshold calibration enhance the effectiveness of contrarian trading approaches.

In sum, this study highlights the importance of adaptive, seasonally-aware strategies in energy markets. It offers a practical framework for improving trading precision and profitability through flexible parameterization and strategic timing, challenging the assumptions of the Efficient Market Hypothesis (EMH) [130].

This study offers novel insights that address gaps in prior research and significantly enrich the existing literature on technical trading strategies in crude oil markets.

First, results show that RSI-based strategies match SOI performance in oversold conditions but outperform in overbought scenarios, especially when using RSI75, supporting H1. This highlights the strategic advantage of adjusting RSI thresholds to better identify profitable signals in bullish markets [130].

Second, the study underscores the value of flexibility in technical trading rules. While parameter adjustments have limited effect on oversold signals, they considerably improve overbought signal performance—particularly with RSI75—demonstrating that rigid adherence to traditional thresholds may constrain returns [130].

Third, findings confirm the importance of seasonal timing. Contrarian strategies deliver superior returns in Q2, especially for oversold signals. For overbought signals, gains are generally stable across quarters, with RSI70 in Q1 showing a notable exception. These outcomes emphasize the need for timely strategy adjustments in response to changing market conditions.

Fourth, the analysis shows statistically significant positive returns from both RSI and SOI contrarian strategies over a 250-day holding period. Notably, RSI25 achieves an AHP250 above 40%, highlighting its effectiveness in exploiting mean-reversion dynamics [131].

Finally, combining adaptive parameters with seasonal timing yields the highest profitability, especially using RSI25 in Q2 for oversold signals and RSI75 for overbought scenarios. These results affirm that dynamic, context-aware strategies are more effective in capturing opportunities in volatile energy markets. Investors are thus encouraged to continuously adjust strategies to optimize performance in evolving market environments.

3.3 Intelligent decision-making in energy finance: the role of reinforcement learning

The integration of energy markets with financial engineering has given rise to the specialized field of energy finance, which addresses valuation, risk management, and investment decisions in energy-related assets. Energy markets are uniquely complex due to high volatility, seasonality, regulatory impacts, physical constraints, and mean-reversion behaviors, rendering traditional financial models often inadequate. Recent advancements in artificial intelligence—particularly reinforcement learning (RL)—offer promising tools for managing such complexity. RL's strength lies in its focus on sequential decision-making and learning from interaction with uncertain environments, making it well-suited to financial domains where outcomes unfold over time. Unlike supervised learning, RL does not require pre-labeled data, enabling adaptive strategies based on evolving market feedback.

This review paper explores the intersection of RL and energy finance, with a particular emphasis on its applications in derivatives pricing, trading strategies, and risk management. While existing literature has reviewed RL in general finance and forecasting in energy markets separately, a comprehensive review focused on RL within energy finance remains lacking [132].

This gap is timely and significant. Global energy markets are undergoing rapid change due to decarbonization, renewable integration, and distributed energy resources—trends that introduce new uncertainty. Simultaneously, RL methods, especially deep reinforcement learning, are advancing rapidly and proving effective in similarly complex environments. The paper makes several contributions: it introduces a conceptual framework linking RL to energy finance, highlights the unique market characteristics suitable for RL, critically assesses current RL methodologies, and identifies open research questions. The review is intended for researchers in finance and machine learning, market practitioners, regulators, and students, providing both foundational knowledge and direction for future work.

This paper is structured around three pillars to explore the application of reinforcement learning (RL) in energy finance.

Pillar 1 – RL Foundations: This section outlines the theoretical basis of RL, focusing on the Markov Decision Process (MDP) framework and its relevance to sequential decision-making under uncertainty. It reviews key algorithms—from classical Q-learning to deep RL—and compares RL to traditional financial methods, highlighting RL's strengths in modeling complex, non-linear systems. Practical implementation issues, such as data needs and reward design, are also discussed.

Pillar 2 – Energy Market Characteristics: Energy markets exhibit features such as high volatility, seasonality, regulatory constraints, and asset-specific physical limitations. These complexities challenge traditional models but align well with RL's adaptive capabilities.

Pillar 3 – Application Domains: Three main application areas are identified:

1. **Forecasting and Trading** – RL for price prediction and strategy optimization.
2. **Derivatives Valuation** – RL methods for pricing energy options and real asset valuation.
3. **Power Systems Option Value** – RL for system reliability and flexibility valuation in smart grids.

Previous work on RL in finance has focused on traditional assets, with limited attention to energy-specific challenges. While foundational energy finance literature (e.g., Eydeland & Wolyniec; Weron) established key market dynamics, they primarily relied on parametric models. More recent research on smart grids and system optimization has largely excluded RL methods.

This paper addresses these gaps by linking RL theory to energy market complexities and demonstrating its potential in various financial applications. A comprehensive review of reinforcement learning (RL) in energy finance is both timely and necessary. Despite rapid growth in this field, research remains fragmented across finance, computer science, energy systems, and operations research, hindering cross-disciplinary knowledge sharing. Additionally, the fast evolution of RL methods and

energy markets has outpaced practitioners' understanding of available tools and their suitability for specific applications. Structural changes in global energy systems—driven by decarbonization, technology, and renewables—further underscore the need for adaptive, data-driven approaches. Implementing RL in energy finance also demands interdisciplinary expertise, reinforcing the value of an integrated review.

This section provides foundational insights into RL's theoretical principles in financial contexts, highlighting how RL supports complex decision-making under uncertainty. It then categorizes key RL algorithms based on their relevance to financial applications [133]:

- **Value-based methods** (e.g., Q-learning, DQN) estimate value functions and are well-suited for discrete decision problems such as trading strategies.
- **Policy gradient methods** (e.g., REINFORCE, TRPO, PPO) optimize policies directly and are effective in continuous control tasks like portfolio management.
- **Actor–critic methods** (e.g., A2C, DDPG) combine value estimation and policy learning, offering stability and flexibility for complex financial environments.
- **Model-based methods** (e.g., Dyna-Q, MBPO) build environment models for planning and simulation, improving data efficiency—an advantage in costly or data-scarce financial settings.

Together, these RL approaches offer promising solutions for the dynamic, uncertain, and data-constrained landscape of modern energy finance. Traditional financial modeling methods, while foundational, face significant limitations in addressing the complexity of energy markets.

Dynamic programming and stochastic control, grounded in the Hamilton–Jacobi–Bellman equation, offer rigorous solutions for sequential decision-making. However, they require fully specified system dynamics and reward structures, making them impractical for high-dimensional or complex environments like energy markets.

Monte Carlo simulations provide flexibility in handling uncertainty but depend on predefined stochastic models, which can introduce model risk if assumptions diverge from real-world behavior.

Parametric models, such as Black–Scholes or GARCH, offer interpretability and efficiency but rely on restrictive assumptions (e.g., normality, constant volatility) that often fail in the context of volatile and nonlinear energy markets.

Reinforcement learning (RL) addresses many of these shortcomings. Its model-free nature eliminates the need for explicit system modeling, and its integration with deep learning enables the capture of complex, non-linear relationships. RL's adaptability to new data allows for continuous policy updates in dynamic environments, and its flexible structure supports multiple objectives and constraints. Nevertheless, these benefits come with trade-offs, including increased data and computational demands, as well as challenges in interpretability—issues explored in later sections of this review. Energy commodities (e.g., electricity, natural gas, crude oil) exhibit unique price behaviors that distinguish them from traditional financial assets, posing distinct modeling challenges.

Extreme volatility is a defining feature—particularly in electricity markets—where prices can fluctuate by several hundred percent, far exceeding typical asset volatility. For example, during the 2021 Texas winter storm, wholesale electricity prices spiked to USD 9000/MWh, a 9000% increase, driven by surging demand and widespread generation outages.

Mean-reversion is another key characteristic. Unlike random walks observed in equities, energy prices tend to revert to levels anchored in production costs. Reversion speeds vary: electricity prices may normalize within hours, while commodities like natural gas may take months.

Price spikes are frequent and severe in energy markets, often triggered by weather events, infrastructure failures, or regulatory constraints. These transient but significant deviations pose challenges for traditional models, which struggle with non-normal distributions and sudden discontinuities.

Multi-scale temporal patterns further complicate modeling. Energy prices reflect intraday demand cycles, weekly and seasonal variations, and long-term shifts due to policy and technology changes. This layered structure requires methods capable of capturing both short-term volatility and long-term trends.

Traditional parametric models often fail to represent these complex dynamics due to restrictive assumptions. In contrast, **reinforcement learning (RL)** offers a flexible, data-driven approach that does not rely on predefined stochastic structures, enabling adaptive learning from empirical patterns.

Energy markets are governed by **complex temporal, physical, and financial dynamics** that challenge traditional financial modeling approaches. These complexities create opportunities for **reinforcement learning (RL)** methods, which offer greater adaptability and decision-making flexibility [134].

1. Temporal Structure and Cyclicity

Energy prices exhibit **multi-timescale temporal patterns**, including:

- **Intraday fluctuations**, with peak demand (typically 4–7 pm on weekdays) commanding price premiums.
- **Weekly cycles**, reflecting lower weekend consumption.
- **Seasonal variations**, driven by weather-related demand (e.g., heating in winter, cooling in summer).
- **Annual cycles** in commodities like natural gas, shaped by storage injection and withdrawal behaviors.

These overlapping temporal components form **dynamic, multi-layered price structures**. RL methods can model such dependencies **without requiring explicit parameterization** of cyclical components.

2. Physical Constraints and Embedded Optionality

Energy assets face **physical and operational constraints** that introduce **real optionality**:

- Power plants have **start-up costs, ramp-rate limits, and output thresholds**.
- Energy storage systems face **capacity limits, efficiency losses, and cycle degradation**.
- Transmission constraints lead to **locational price differentials**.

These operational realities generate **complex sequential decision problems**, which RL is well-suited to address due to its ability to **optimize over time under constraints**.

3. Market Incompleteness and Valuation Challenges

Energy markets exhibit **financial incompleteness**, creating valuation and risk management challenges:

- **Basis risk** arises when available hedging instruments do not match the specific temporal or locational exposure of physical assets.
- **Liquidity constraints** lead to wide bid–ask spreads, price impacts from large trades, and limit rebalancing—violating assumptions underpinning risk-neutral valuation.
- **Participant heterogeneity**, including diverse objectives and constraints, further complicates price formation and violates standard equilibrium assumptions.

These features undermine traditional no-arbitrage valuation models, requiring tools that can handle transaction costs, partial hedging, and market frictions—domains in which RL excels.

The inherent complexities of energy markets—including layered temporal patterns, embedded physical optionality, and market incompleteness—necessitate advanced modeling frameworks. Reinforcement learning provides a compelling alternative by offering data-driven, adaptive approaches capable of navigating the intricate, dynamic environments of energy systems. Its capacity to learn optimal policies under uncertainty, accommodate constraints, and adapt to structural change positions it as a transformative tool for modern energy finance.

Accurate price forecasting remains a cornerstone of energy trading and risk management. Traditional forecasting methodologies in energy markets include time series models such as ARIMA and GARCH, fundamental models based on supply–demand equilibrium, grey system theory, and classical machine learning algorithms including neural networks and support vector machines. Among these, grey system theory—originating from Deng (1982) [135]—has proven particularly useful in settings characterized by data scarcity and uncertainty, traits commonly associated with energy markets. Grey models such as GM(1,1) and its variants require minimal historical data and have shown competitive performance in electricity price forecasting. These models are particularly effective when dealing with non-stationary

series or limited datasets and have been enhanced further through hybridization with wavelet transforms, neural networks, and residual correction strategies to improve forecasting accuracy across multiple horizons.

Reinforcement learning (RL) presents a fundamentally different paradigm for addressing forecasting problems by framing them as sequential decision-making tasks rather than static prediction exercises. This shift enables learning agents to adaptively update forecasting strategies in response to dynamic market environments. Rodrigues Dos Reis et al. (2025) [136] identified a clear trend toward incorporating advanced computational intelligence in medium- and long-term energy forecasting, emphasizing the value of dynamic approaches like RL that are capable of capturing evolving market structures and nonlinear dependencies.

Several streams of research have applied RL directly to energy price forecasting. The *direct forecasting approach* employs RL algorithms to predict future prices by learning from historical patterns and market feedback. For example, Pannakkong et al. (2023) [137] implemented a Double Deep Q-Network (DDQN) to dynamically select the optimal ensemble of machine learning models for peak electricity demand forecasting. This adaptive ensemble selection improved accuracy and demonstrated RL's capacity for real-time adaptation in volatile environments.

Adaptive forecasting is another promising area. An adaptive RL framework that selects forecasting models from a portfolio based on prevailing market conditions. In this meta-learning approach, the RL agent navigates a state space incorporating recent prices and exogenous features, while its action space consists of alternative forecasting models. Their results indicated superior performance, especially during regime shifts—an advantage over static forecasting strategies.

Energy forecasting has also benefited from advances in deep learning and hybrid modeling techniques. Hybrid decomposition techniques have further enhanced forecasting accuracy. A method combining Variational Mode Decomposition (VMD) with CNN-LSTM architectures for photovoltaic output forecasting, outperforming conventional models. These domain-specific enhancements underscore the importance

of embedding physical and operational knowledge in forecasting models—an area where RL also excels, given its interactive learning framework.

The optimization of neural network architectures has emerged as a complementary research direction. A hybrid genetic algorithm–particle swarm optimization (GA-PSO) technique for tuning deep neural networks used in photovoltaic generation and energy consumption forecasting. Their method improved accuracy by up to 27% over standard models. This evolutionary optimization paradigm shares conceptual similarities with policy optimization in RL, suggesting opportunities for methodological cross-fertilization.

Reinforcement learning has also demonstrated value in feature selection and engineering. Q-learning within a blockchain-enabled smart grid context for electricity price forecasting approach for modeled grid operator–consumer interactions using a Stackelberg game framework, enabling real-time pricing optimization in multi-agent systems—an increasingly relevant scenario in decentralized and prosumer-driven energy markets.

Ensemble forecasting using RL has also gained traction. This method outperformed both individual models and static ensembles, particularly during market regime transitions. Such adaptability is critical in energy markets, where price dynamics are shaped by a confluence of stochastic demand, intermittent generation, and regulatory change.

Beyond forecasting, RL methodologies are increasingly employed in trading strategy development. The challenges of high volatility, non-stationarity, and intricate seasonality in energy prices require strategies that can adapt dynamically. Multy-agent deep reinforcement learning framework for bidding in day-ahead electricity markets, where agents approximated Nash equilibria through iterative learning in simulated environments. This model effectively captured strategic behavior in oligopolistic settings.

RL is also making inroads into energy risk management. Traditional risk metrics such as Value at Risk (VaR) and Conditional VaR (CVaR) have long underpinned energy finance. VaR quantifies the maximum expected loss over a given horizon at a

specific confidence level, while CVaR captures tail risk beyond the VaR threshold. Advanced implementations of these metrics increasingly rely on machine learning. These developments provide a natural entry point for RL-based risk management solutions. By interacting with stochastic environments, RL agents can learn to dynamically adjust hedging strategies and risk exposure, potentially improving robustness in the face of market uncertainty.

This review has explored the diverse applications of reinforcement learning (RL) in the domain of energy finance, with a focus on key areas such as price forecasting, trading strategies, derivatives valuation, and the assessment of option value in power systems. The unique characteristics of energy markets—marked by extreme price volatility, pronounced seasonality, regulatory complexity, and the physical constraints of assets such as power plants and storage facilities—pose substantial modeling challenges that traditional financial approaches often struggle to address.

Reinforcement learning offers several critical advantages in tackling these challenges. Unlike classical methods that typically require simplifying assumptions about price dynamics or system behavior, RL learns directly from data through trial-and-error interaction with the environment. This data-driven approach enables RL to capture complex, nonlinear relationships that are pervasive in energy systems. Moreover, RL methods inherently adapt to non-stationary and evolving market conditions—an essential capability given the ongoing transformations in energy systems driven by decarbonization, decentralization, and digitalization. Another strength of RL lies in its ability to incorporate diverse operational, regulatory, and physical constraints directly into the learning and decision-making process, which is often difficult to achieve with traditional optimization models.

One of the most compelling applications of RL in energy finance lies in the quantification and capture of option value—the economic value derived from operational flexibility under uncertainty. Emerging technologies such as smart grids, energy storage systems, and demand-side response introduce significant real options. These options reflect the difference in expected system costs with and without access

to flexible resources. Accurate valuation of this flexibility is essential for optimal investment planning and system operation.

Traditional approaches to option valuation in energy systems have relied heavily on stochastic optimization methods. While effective in many cases, these methods often become computationally prohibitive in high-dimensional settings and may struggle to model non-linear dependencies and sequential decision processes. In contrast, RL is particularly well-suited for this task due to its capacity for policy learning over long horizons, its ability to handle uncertainty in a dynamic and adaptive fashion, and its flexibility in modeling multi-stage decision problems [138].

Despite these advantages, several important challenges remain in the practical application of RL to energy finance. Interpretability remains a central concern, as the opaque nature of many RL algorithms limits their adoption in settings where transparency and regulatory compliance are paramount. Data scarcity can also hinder performance, particularly in settings where high-resolution market or operational data are limited. Generalization—the ability of an RL model trained in one context to perform effectively in another—remains a nontrivial hurdle, especially given the heterogeneity of energy markets across geographies and time. Furthermore, the computational demands of RL can be significant, particularly when modeling large-scale systems or incorporating high-frequency data. Finally, the absence of standardized benchmarks and evaluation protocols makes it difficult to compare methodologies and assess real-world readiness.

To address these limitations, several research directions warrant further exploration. First, developing interpretable and explainable RL models tailored for energy applications could enhance trust and facilitate adoption by industry stakeholders. Second, designing robust RL algorithms capable of performing reliably under extreme or previously unseen market conditions is crucial, especially in the context of climate change and geopolitical disruptions. Third, multi-agent reinforcement learning frameworks offer promise for modeling strategic interactions among heterogeneous market participants such as generators, consumers, aggregators,

and regulators. The integration of sector coupling is another emerging area that will benefit from the flexible modeling capacity of RL.

In addition, hybrid approaches that combine RL with traditional methods such as stochastic optimization represent a particularly promising avenue for future research. In such frameworks, stochastic optimization can be used to define the scenario tree, uncertainty structure, and high-level planning boundaries, while RL algorithms are employed to discover fine-grained, adaptive operational policies within these structures. This integration could yield models that combine the rigor of optimization with the adaptability and learning capability of RL.

In conclusion, reinforcement learning represents a powerful and versatile methodology for addressing the unique challenges of energy finance. Its strengths in handling complexity, learning from data, adapting to change, and capturing the value of operational flexibility make it especially well-suited for the evolving landscape of modern energy systems. While several technical and practical hurdles remain, the growing body of research and early industrial applications suggest that RL is poised to significantly reshape how energy assets, contracts, and markets are valued, traded, and managed in the years ahead.

3.4 Analysis of mode-adjustment tests of boiler TIII-312A

The main purpose of the work was to conduct testing and adjustment tests of the boiler TIII-312A in the operational range of loads and adjusting the mode maps of the boiler and vacuum cleaners during its transfer to solid fuel combustion, which differs from the design general and specific. The results of mode-adjustment tests with determination of: dependence of influence of steam productivity on mode, and economic indicators of boiler operation are given; dependence of the optimal coefficient of excess air on steam production; the magnitudes of air intake into individual elements and the gas path as a whole; determining the mode of operation of the dust system. Compiled mode map of the boiler and vacuum cleaner. The suggestions for increasing the efficiency and reliability of the boiler are given.

Keywords: boiler, coal, fuel, liquid sniffer, cold air, heat losses, gross boiler efficiency.

Introduction

According to Presidential Decree No. 37/2017 “On the decision of the National Security and Defense Council of February 16, 2017 “On urgent measures to neutralize the threats to the energy security of Ukraine and strengthen protection of critical infrastructure”, to perform the repair schedule of the main equipment of thermal power plants there was a need for regime-commissioning trials boiler TIII-312A of TPP in the operational range of loads and adjustment of the mode maps of the boiler and vacuum cleaners when transferring it to solid fuel combustion, which differs from the design general and specific properties.

Boiler type TIII-312A direct-flow, dust-coal, liquid-liquid, single-hull, U-shaped layout, with intermediate steam overheating. The boiler operates in a monoblock with a K-300-240-2 XTF3 turbine rated at 300 MW [139].

Methods of testing. The test was carried out according to a commonly accepted method [139] and agreed by the Work Program of Testing.

The boiler test and debug tests included preparatory work and debug experiments.

Mode-adjusting experiments included determination of air intakes in the fuel and gas path of the boiler, determination of the optimal value of the coefficient of excess air in the section, characteristics of the steam and gas-air tracts of the boiler, as well as experiments on the determination of the optimal values of the operating parameters, heat losses and boiler efficiency. The processing of test results was performed according to [139, 140, 142, 143].

Methods of measurements. Measurements of the basic parameters of the boiler operation were carried out with the help of staff control equipment. The temperatures, pressures, costs, electrical power of the turbogenerator, the temperatures along the boiler's gas-air path were measured by standard control devices [144-149]. The flue gases for gas analysis were extracted from the cross section of the gas duct in front of the water economizer (mode cross section) and after the smoke smokes (balance cross section) and were performed with a tared TESTO-340 gas analyzer.

To determine the air intake in the sections of the gas tract, gas analysis was performed in cross sections by regenerative air heaters. Samples of solid fuels for determination of ash content, humidity and caloric content were carried out from the feeders of raw coal. Dust samples to determine fineness of grinding and humidity were taken from dust leaks under cyclones.

Samples of ash for the determination of combustible (mechanical non-combustible) were collected from flue gases with the help of regular port installations from the gas line in front of the water economizer.

The solid fuel consumption of the boiler was determined by the inverse balance. Characteristics of solid fuels, dust specimens, as well as the content of combustible fuels were carried out by the staff of the coal laboratory of TPP.

Test conditions. The auxiliary equipment that provides the preparation and supply of fuel to the fuel and the hydroelectric removal system were designed for the operation of the boiler on the screenings of gas coal «ГCIИ». Non-project fuel characteristics are as follows: $Q^{w_1} = 5524$ kcal / kg; $W^w = 16.4\%$; $A^w = 11.1\%$; $V = 41.7\%$ (dry ashless mass).

The quality of this coal at the yield of volatiles and the calorific value of coal corresponds to the domestic coal of the gas group. In the conditions of TPP, it is impossible to allocate a separate site for the storage of non-project fuel, so storage was performed only on one side of the coal warehouse, from where it was fed for burning.

During the mode-adjusting experiments, the average quality characteristic of solid fuel was as follows: $Q^{w_1} = 5265 \text{ kcal / kg}$; $W^w = 12.2\%$; $A^w = 19.1\%$; $V = 41.7\%$ (by working mass).

Test results. Mode-adjusting experiments were carried out in the load range of the block 65.0-100% of the nominal, which corresponds to the steam capacity of the boiler 638,0-951,0 t/hr when burning solid fuel.

Carry out mode experiments to determine the need and amount of illumination by another type of fuel. It is experimentally established that when burning coal with $Q^{w_1} = 5265 \text{ kcal / kg}$, excess air close to the optimum and satisfactory condition of the burners in the range of loads of the block 65-100% of nominal, provides a satisfactory escape of liquid pellets without illumination with natural gas.

Determination of air intakes in fuel and boiler gas ducts. The air intake in the fuel, resulting in a rated load, is approximately 5.0%, which complies with the requirements [142].

Rated to the nominal load air intake in the gas path from the water economizer and to the exit of the smokestacks are 41.7%, with an allowable value of 35% according to requirements [142]. The parcels mentioned parcels are distributed as follows:

- in water economizer, gas pipeline and regenerative air heater (RAH) - 26,0%;
- from RAH and electrostatic precipitators with adjacent gas ducts - 15.7%.

The total air intake in the convective mine, the gas duct and the RAH increase the amount of gases passing through the RAH, which leads to an increase in the temperature of the exhaust gases, excess air in the exhaust gases, the power consumed by smoke smokes, that is, to reduce the efficiency of the boiler.

Airflows through the lower seals of the RAH and aspirations in the filters with adjacent gas ducts reduce the temperature of the exhaust gases, increase the excess air in them and practically do not change the heat loss with the exhaust gases, and lead to

a decrease in the efficiency of the boiler only due to the consumption of smoke and vents.

Determination of the optimal value of the fineness of grinding coal (R_{90}).

Taking into account the tests performed at burning of similar coal at TPP [140], experiments to determine the optimal fineness of grinding (R_{90}) were not performed and accepted according to the recommendations [140] and the regime map. The fineness of grinding coal (R_{90}) during the experiments was 24 - 25%.

Determination of the optimal value of the coefficient of excess air in the section.

The optimal excess air in the regime section was selected from the conditions of the absence of products of chemical unburned (CO) in the flue gas, the minimum content of combustible in the removal and satisfactory melting of the slag.

The optimum excess air in the mode section at a boiler load of 100% of the nominal is 1.15, at a load of 80% is 1.2, and at a load of 65% is 1.22.

With excess air below the optimum by 0.03-0.04, the products of chemical unburned (CO) appear and the content of combustible in the carry-on (losses with mechanical unburned) increases. The dependence of the optimal excess air on the steam capacity of the boiler is shown in Fig. 1.

The total relative consumption of feed water for injection to the overhead steam superheater (II injection) and to the high-pressure convective steam superheater (CSS) (III injection) in the operating range of loads is 10.7-13.6% of the consumption of superheated steam.

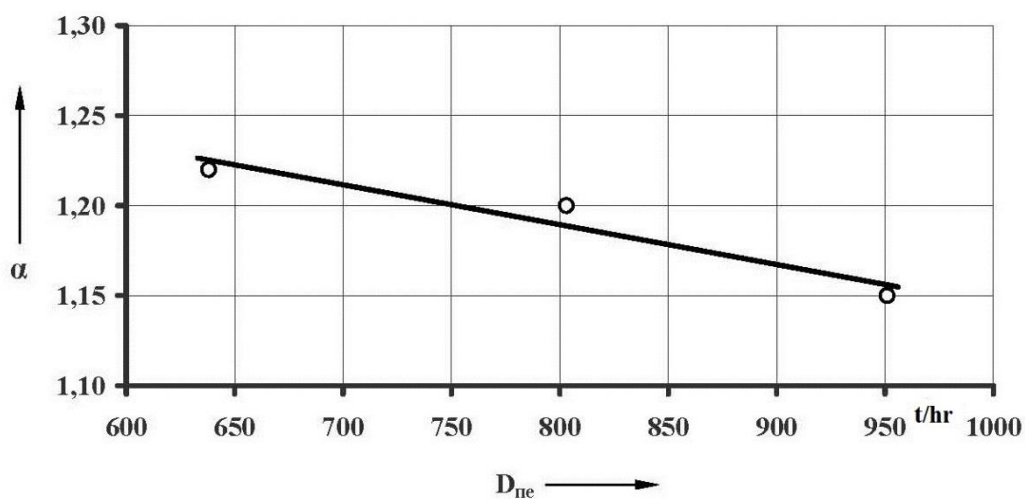


Fig. 1. Dependence of the optimal coefficient of excess air on the steam capacity of the boiler.

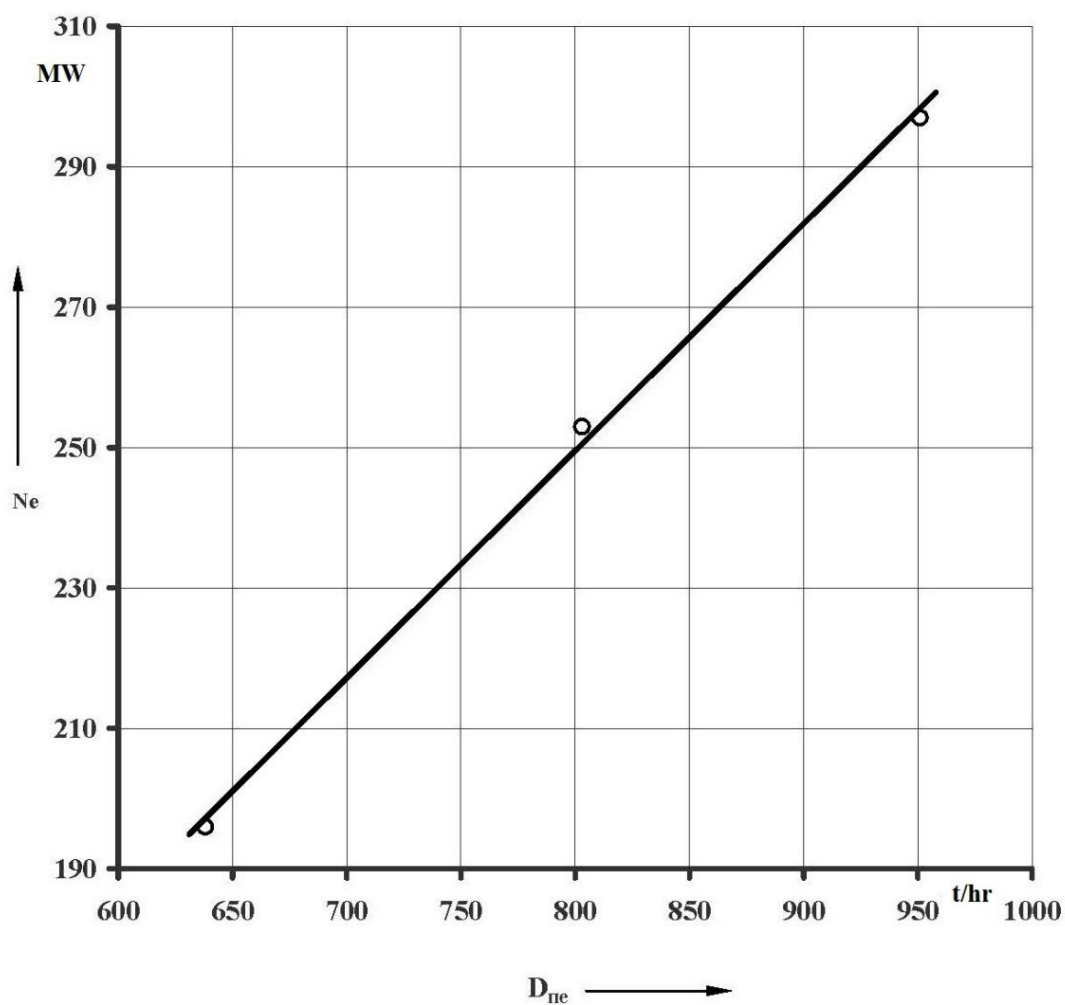


Fig. 2. Dependence of electrical load of the unit on its steam capacity.

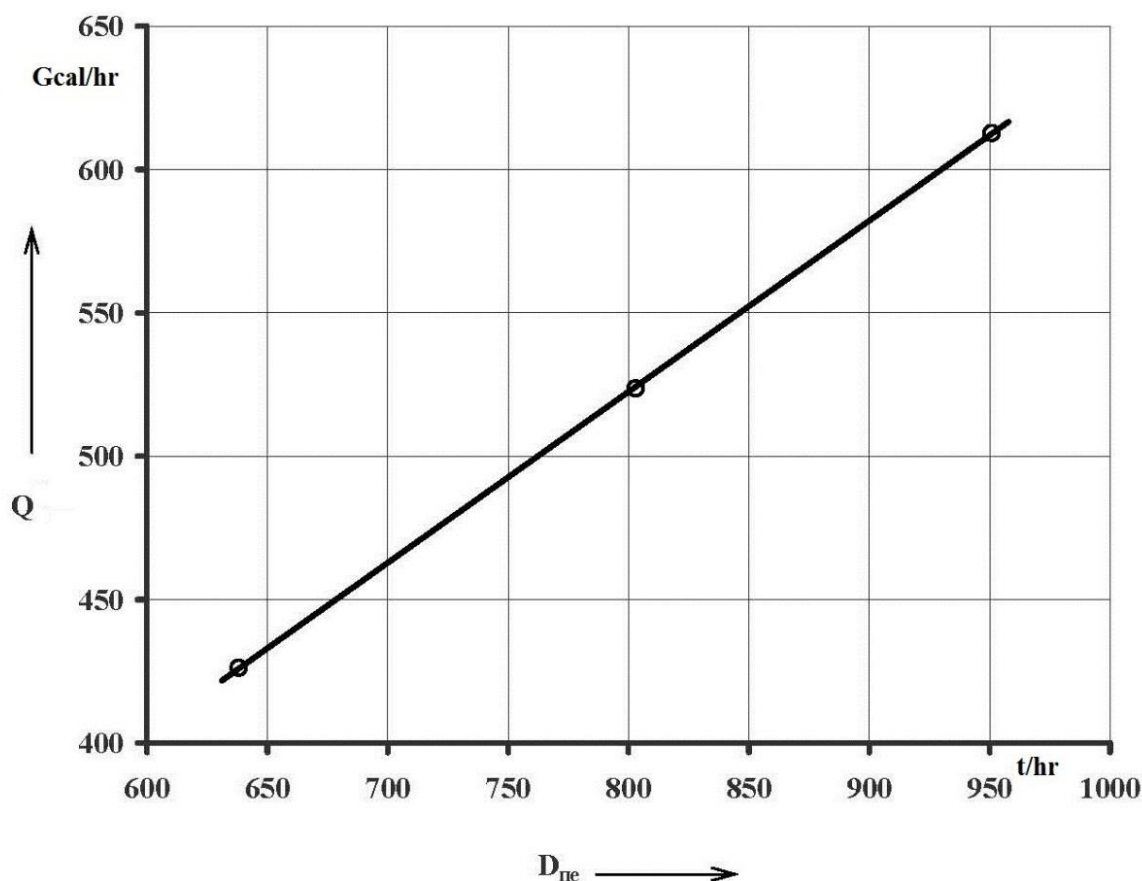


Fig. 3. The dependence of the heat capacity of the boiler on its steam capacity.

The secondary steam temperature at the boiler was maintained at ~ 545 °C. Figures 2, 3 show the dependencies that relate the electrical load and heat output of the boiler to the consumption of superheated steam.

Mode map of the boiler and dust system. According to the results of the tests, a mode map of the boiler was prepared when burning solid fuel (Table 1). The mode map is made for the condition of the equipment, which took place during the period of testing, in the range of boiler loads 65-100% of the nominal (load unit 196 - 287 MW) and included in the operation of the high-pressure heater. In the case of measures to seal the furnace and gas pipelines, reconstruction of individual heating surfaces, significant changes in the quality of coal and the like, the mode map must be corrected.

Table 1

Mode map of the boiler ТПІІ-312А and its dust system.

№	Name of the parameter	Unit of measurement	Electrical load			Remarks
			200	250	300	
1	Steam capacity of the boiler	t/hr	638,0	803,0	951	
2	Consumption of nutritious water	t/hr	568	710	820	
3	Feeding water temperature	°C	243	256	265	
4	Temperature of superheated steam	°C	545			
5	Pressure of superheated steam	kg/cm ²	250			
6	The temperature of cold preheat steam in front of the boiler	°C	285	292	300	
7	Pressure of cold preheat steam in front of the boiler	kg/cm ²	25	31	37	
8	Steam temperature of hot boiler overheating	°C	545			
9	Ambient temperature to the built-in latch	°C	415	420	425	not more 430
10	Steam temperature for the overheating steam superheater (up to III injection)	°C	520	525	525	not more 525
11	O ₂ content of flue gases	%	3,8	3,5	2,8	not lower 2,5
12	Dilution at the top of the fuel	kg/m ²	2 -5			
13	Dilution for convective superheater	kg/m ²	14-18	18-20	20-24	not more 35
14	Resistance is a regenerative air heater	kg/m ²	75-80	85-90	120-130	
15	The temperature of the gases in the rotary chamber	°C	790-810	820-840	850-880	not more 920
16	Flue gas temperature	°C	162	164	166	
17	Air temperature to regenerative air heater	°C	30			
18	Secondary air temperature	°C	335	345	355	
19	Secondary air pressure in front of the burner	kg/m ²	100	130	160	
20	The position of the secondary air vents in front of the burner: - central - peripheral	%	100 10 – 15	100 10 – 15	100 10 – 15	
21	Number of operating dust extractors	pcs.	12 – 14	14 – 16	14 – 16	
22	Number of dust systems in operation	pcs.	2	2	2	
23	Dilution in front of the mill	kg/m ²	70-90	70-90	70-90	
24	Mill resistance	kg/m ²	200-240	200-240	200-240	
25	The temperature of the mixture over the mill	°C	70-80			not more 90
26	O ₂ content per mill fan	%	14,5-15,5			not more 16
27	Pressure in the pressure head mill fan	kg/m ²	260-290			not more 300
28	Moisture dust in the hopper	%	1,0-1,5			R ₉₀ =24-25
29	Dust level in the hopper	m	3,5 -4,5			

The mode map is made when burning solid fuel with the following characteristics:

$Q^w_1 = 5265 \text{ kcal / kg}$; $V = 40.0\%$, $Q^w_1 = 12.0-14.0\%$; $A^w = 18.0-20.0\%$.

Conclusions

Based on the work done, we can draw the following main conclusions:

In the boiler load range of 65-100% of nominal (unit capacity 196-297 MW), the combustion of solid fuel without natural gas illumination ensures stable long-term operation of the boiler with nominal parameters and satisfactory liquid beet yield.

The air intake in the boiler furnace, reduced to nominal load, is 5%, which complies with the requirements [142].

Air aspirations into the gas path of the boiler in the section "water economizer - exhaust", reduced to nominal load, make 47% at the rate of 35% according to [142].

When burning only solid fuel in quality (Q, A, W, V), which was during the mode-setting experiments, the optimal fineness of grinding of coal on a residue on a sieve of 90 microns can be considered 24-25%.

The optimum excess air in the mode section at boiler loads of 65%, 80% and 100% of the nominal is 1.22, 1.2 and 1.15 respectively.

At boiler loading, $\sim 100\%$ of the boiler's gross efficiency when burning solid fuel is 88.7% at an estimated 89.72% at rated load and burning only solid fuel.

The consumption of solid fuel is calculated according to the inverse balance at the same time is 131,2 t/hr.

When boiler load is 65% of nominal boiler gross efficiency, when burning solid fuel is 87.58%.

Consumption of solid fuel calculated on the reverse balance at a load of 65% of the nominal is 92.4 t/hr.

A mode map has been developed according to which the boiler operation mode can be maintained.

SECTION 4. INFORMATICS AND CYBERNETICS

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.4.1

4.1 Метод передачі даних у кабельній волоконно-оптичній лінії зв'язку для технології FTTx на основі лазерного випромінювання

Вступ. На даний час технологія Fiber to the X (FTTx) має безліч переваг, які пов'язані зі швидкістю і пропускнуою здатністю передачі даних та нижчим споживанням енергії. Тому, застарілі дротяні лінії зв'язку (мідні мережі) замінюються FTTx. Така архітектура надає доступ до мережі Інтернет через волоконно-оптичну лінію зв'язку (ВОЛЗ) та забезпечує швидкість передачі даних 1000 Мбіт/с. Тому, одним із найбільш перспективних напрямків мережевого зв'язку як у провідних країнах світу, так і в Україні є ВОЛЗ, що дозволяють передавати дані з великою інформаційною ємністю і підвищеною скритністю та мають високу надійність роботи. Вони значно перевершують відомі дротяні лінії зв'язку за такими показниками, як пропускна здатність, довжина регенераційної ділянки, а також перешкодозахищеність. При цьому, стабільна якість з'єднання зберігається при під'єднанні декілька пристроїв одночасно, що робить ВОЛЗ зручною альтернативою сервісам локальних провайдерів.

Однак, при використанні у ВОЛЗ лазерного випромінювання (ЛВ) у якості носія даних (інформації) не враховуються його особливості – багатомодова структура та можливість передачі даних на поздовжніх модах (несучих частотах).

Таким чином, розробка методу передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології FTTx на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ є актуальною науковою задачею.

Виклад основного матеріалу. Актуальність використання технології FTTx обумовлена сучасними вимогами до високошвидкісного, надійного та масштабованого доступу до мережі Інтернет як для побутових (приватних), так і для бізнес-користувачів (компаній, підприємств тощо). До ключових аспектів, які обґрунтовують актуальність її використання можливо віднести наступні.

1. Постійне збільшення об'ємів трафіку:

- збільшення використання потокового відео (YouTube, Netflix, IPTV тощо), онлайн-ігор, хмарних сервісів, відеоконференцій (Zoom, Teams тощо) вимагає стабільного та швидкого з'єднання з Інтернет ресурсами;

- FTTx забезпечує гігабітну пропускну здатність, яка стає критично важливою у цифровому середовищі.

2. Розвиток цифрової економіки та Smart-технологій:

- розгортання «розумних міст» і «розумних будинків», Інтернету речей (IoT), дистанційної освіти та електронного урядування вимагає надійної інфраструктури з низькими затримками даних у часі;

- FTTx служить основою для реалізації таких рішень, завдяки високій пропускній здатності та мінімальним затримкам даних.

3. Масштабованість та довгострокова інвестиція:

- на відміну від мідних ліній, ВОЛЗ не вимагають повної модернізації при зростанні потреб користувачів – достатньо оновити термінальне обладнання;

- такі мінімальні фінансові витрати робить FTTx економічно доцільною інвестицією на десятки років уперед.

4. Енергозбереження та екологічність:

- ВОЛЗ споживають менше електроенергії на одиницю переданих даних, що важливо в умовах енергетичних викликів та екологічної відповідальності.

5. Надійність та стабільність зв'язку:

- ВОЛЗ нечутливі до електромагнітних завад, дощу, гроз тощо, що забезпечує вищу стабільність зв'язку у порівнянні з мідними технологіями (ADSL та VDSL).

6. Зростання вимог до телеком-інфраструктури після пандемії COVID-19:

- пандемія показала важливість надійного доступу до мережі Інтернет для дистанційної роботи, навчання, медицини тощо;

- FTTx дозволяє ефективно масштабувати інфраструктуру під такі різнотипні навантаження.

7. Підтримка новітніх технологій та 5G:

– ВОЛЗ є основою для backhaul-інфраструктури 5G, що дозволяє забезпечити передачу великих об'ємів даних між базовими станціями та ядром мережі.

Таким чином, технологія FTTx є ключовим елементом сучасної інформаційної інфраструктури, яка здатна задовольнити не лише поточні, а й перспективні потреби суспільства, бізнесу та держави. Її використання забезпечує якісний прорив у сфері цифрових послуг, роблячи її надзвичайно актуальною у епоху цифрової трансформації та швидко зростаючих інформаційних технологій.

Отже, FTTx – це загальна назва технологій побудови широкопasmового доступу до мережі інтернет з використанням волоконно-оптичного кабелю, де "X" позначає точку завершення кабелю у мережі. Такі технології відрізняються одна від іншої саме місцем, до якого доводиться ВОЛЗ.

До основних особливостей технології FTTx можливо віднести наступні:

1. Висока швидкість передачі даних – завдяки ВОЛЗ забезпечується набагато більша пропускна здатність у порівнянні з мідними лініями; підтримка швидкостей до гігабітів за секунду; низький рівень затримок та висока надійність: оптика не піддається електромагнітним завадам, що робить з'єднання стабільним та надійним.

2. Масштабованість – FTTx дозволяє з легкістю збільшувати пропускну здатність у майбутньому без необхідності прокладання нового кабелю – достатньо оновити обладнання.

3. Різні варіанти архітектури FTTx: FTTH (Fiber to the Home) – оптоволокло до самого житлового приміщення; FTTB (Fiber to the Building) – до під'їзду або будівлі, далі сигнал передається по мідному кабелю; FTTC (Fiber to the Curb/Cabinet) – до розподільчої шафи поруч із будинком; FTTN (Fiber to the Node) – до мережевого вузла, який обслуговує декілька будівель; FTTD (Fiber to the Desk) – у корпоративних мережах – ВОЛЗ аж до робочого місця.

4. Підтримка «Triple Play» – одночасна передача даних за Інтернетом, телебаченням (IPTV) та телефонією (VoIP) через єдину мережу.

5. Складність та вартість впровадження – початкове розгортання FTTx є дорожчим, особливо у варіантах FTTH, однак, воно забезпечує довгострокову економію за рахунок меншої потреби під час обслуговування.

6. Перспективність – вважається основою для Smart City, IoT, 5G backhaul та інших передових технологій, які потребують надвисокої пропускної здатності.

До основних переваг FTTx можливо віднести наступні.

1. Висока швидкість передачі даних:

– забезпечує гігабітні швидкості (від 1^{-10} Гбіт/с), що набагато перевищує можливості мідних ліній.

2. Мінімальні затримки (латентність):

– ідеально підходить для онлайн-ігор, відеоконференцій, дистанційного керування тощо.

3. Висока надійність:

– волоконно-оптичні кабелі нечутливі до електромагнітних завад, грозових розрядів та погодних умов.

4. Масштабованість:

– легко нарощується пропускна здатність без заміни кабельної інфраструктури – лише заміна активного обладнання.

5. Енергоефективність:

– порівняно з міддю, волоконно-оптичні кабелі споживають менше енергії для передачі даних.

6. Довговічність:

– термін експлуатації ВОЛЗ складає 25–30 років, що знижує витрати на обслуговування.

7. Підтримка сучасних технологій:

– сумісна з хмарними сервісами, 5G, IP-телебаченням, IoT тощо.

До основних недоліків FTTx можливо віднести наступні.

1. Висока вартість впровадження

– початкові інвестиції у прокладання волоконно-оптичного кабелю, особливо у існуючу міську (сільську) забудову, можуть бути значними.

2. Складність монтажу:

- необхідні спеціалізовані знання та обладнання для зварювання та прокладки волоконно-оптичного кабелю.

3. Крихкість волоконно-оптичного кабелю.

- скляне волокно може пошкодитись при недбалому монтажі або під час експлуатації.

4. Труднощі у модернізації в густозабудованих районах:

- прокладка у історичних (щільно забудованих) районах міста може потребувати координації з місцевою владою або ж викликати незручності у мешканців.

5. Низька окупність у малонаселених районах міста, села тощо:

- витрати на одного абонента значно зростають при низькій щільності населення, що ускладнює впровадження у сільській місцевості.

Таким чином, технологія FTTx забезпечує високу якість зв'язку, необхідну для сучасних цифрових сервісів та вважається найперспективнішою для побудови мереж майбутнього. Попри високу початкову вартість, її переваги у довгостроковій перспективі значно переважають недоліки.

Отже, для технології FTTx використовується інтеграція (суміш) волоконно-оптичних та мідних кабелів, залежно від типу технології. При цьому, до певної точки дотягується волоконно-оптичний кабель, а «остання миля» – вже мідна, як представлено на рис. 1, де:

- за технологією FTTN – волоконно-оптичні кабелі дотягують до мережевого вузла;
- за технологією FTTC – до мікрорайону або кварталу;
- за технологією FTTB – до будівлі;
- за технологією FTTH – до квартири або приватного будинку.

FTTx - Fiber to the X

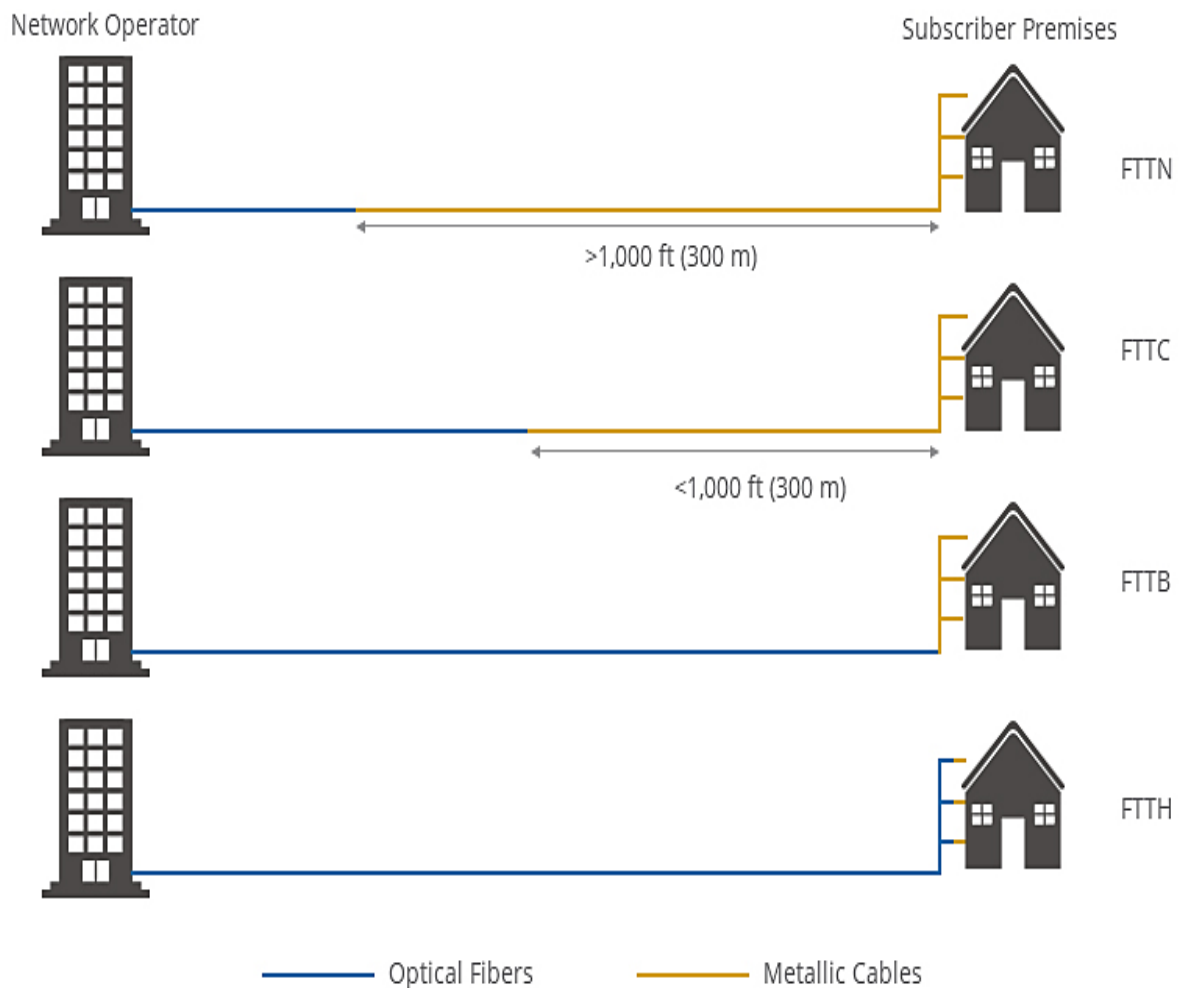


Рисунок 1. Типи технологій FTTx

Відомо, що структурована кабельна мережа (СКМ) – це фізична основа інфраструктури будівлі, яка зводить у єдину систему безліч мережевих інформаційних сервісів різного призначення: локальні обчислювальні мережі (ЛОМ) і телефонні, системи безпеки і відеоспостереження тощо. При цьому, структурована кабельна система (СКС) представляє собою ієрархічну кабельну систему, яка змонтована у будівлі (у групі будівель) та складається зі структурних підсистем.

До складу обладнання СКС входить набір мідних та оптичних кабелів, крос-панелей, з'єднувальних шнурів, кабельних роз'ємів, модульних гнізд,

інформаційних розеток, а також допоміжне обладнання. Усі елементи СКС інтегруються у єдиний комплекс (систему) та експлуатуються відповідно до певних правил.

Кабельна система – це система, до елементів якої належать кабелі та компоненти, що пов'язані з кабелем. До кабельних компонентів належить усе пасивне комутаційне обладнання, що необхідне для з'єднання (фізичного закінчення або термінування) кабелю – телекомунікаційні розетки на робочих місцях, кросові та комутаційні панелі («патч-панелі») у телекомунікаційних приміщеннях, муфти та сплайси.

Структуру кабельної системи визначає інфраструктура інформаційних технологій (ІТ, Information Technology), за якою організується проект кабельної системи відповідно до вимог кінцевого користувача, незалежно від активного обладнання, що може бути застосоване згодом. Побудова СКС основана на використанні кабелів 5 та 6 категорій, багатопарних, волоконно-оптичних та змішаних. До складу елементів та пристроїв для СКС входять різноманітні типи стійок і комутаційних шаф, що також діляться за типом форми і конструкції, підлогового або настінного виконання.

Таким чином, кабельна мережа має велике значення для роботи великого підприємства, що займається виробництвом будь-якої продукції тощо. Вона будується з урахуванням перспективи розвитку підприємства.

Волоконно-оптична лінія зв'язку – технологія передачі даних на великі відстані за допомогою тонких волокон, зроблених зі скла (пластику), що передають світлові сигнали (лазерного випромінювання, ЛВ), які промодульовані з електричними інформаційними сигналами. Такі інформаційні сигнали передаються по волоконно-оптичним каналам у вигляді масиву світлових імпульсів (ЛВ), що дозволяє передавати великі об'єми даних на великі відстані з високою швидкістю та мінімальними втратами сигналу за потужністю. Тому, сучасні ВОЛЗ знайшли широке використання у всесвіті.

Україна має кільцеві системи зв'язку на основі ВОЛЗ, що охоплюють основні регіони, та включена до системи Європейських проектів по

розповсюдженню і підключенню ВОЛЗ за організацією «Укртелеком».

Отже, передача даних (інформації) у ВОЛЗ здійснюється за допомогою світлових хвиль [150]. Світлові хвилі – це електромагнітні хвилі, які поширюються у вакуумі (у різних середовищах) з різною швидкістю. Вони мають довжину хвилі та частоту, які визначаються їх енергією. У залежності від довжини хвилі, світлові хвилі можуть бути видимими для людського ока, такі як кольори від червоного до фіолетового, або невидимими, такі як інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Тому, до складу світлових хвиль входять наступні:

- інфрачервоне випромінювання – $\lambda = 0,78 \dots 1000$ мкм;
- видиме світло – $\lambda = 0,38 \dots 0,78$ мкм;
- ультрафіолетове випромінювання – $\lambda = 0,0001 \dots 0,38$ мкм.

ВОЛЗ використовуються при об'єднанні ЛОМ у різних будівлях, у багатоповерхових та протяжних будівлях, а також у мережах, де пред'являються особливо високі вимоги до інформаційної безпеки та захисту від електромагнітних завад. Волоконно-оптичні кабелі забезпечують більш високу швидкість передачі даних (інформації) і низький рівень шумів, мають невелику вагу і діаметр при більшій можливості передачі даних на великі відстані, а також більш довгий термін служби, ніж дротяні.

Волоконно-оптичний кабель (Optical cable) – це кабель з волоконними світловодами для спрямованої передачі оптичного сигналу (ЛВ). Конструкція світловода – це тонка кварцова нитка, що оточена спеціальною захисною опліткою зі значно меншим коефіцієнтом заломлення, ніж серцевина (рис. 2). Поширення світла у світловоді відбувається за рахунок багаторазового відбиття випромінювання від його бічної поверхні.

Волоконно-оптичний кабель здійснюють передачу даних (голосових сигналів), які генеруються за допомогою імпульсів лазера (світлодіода). Вони можуть бути за типами як одномодові (SM Fiber, вища швидкість передачі даних та більша відстань), так і багатомодові (ММ-волокно, висока пропускна здатність при високих швидкостях на середні відстані) (рис. 3).



Рисунок 2. Волоконно-оптичний кабель

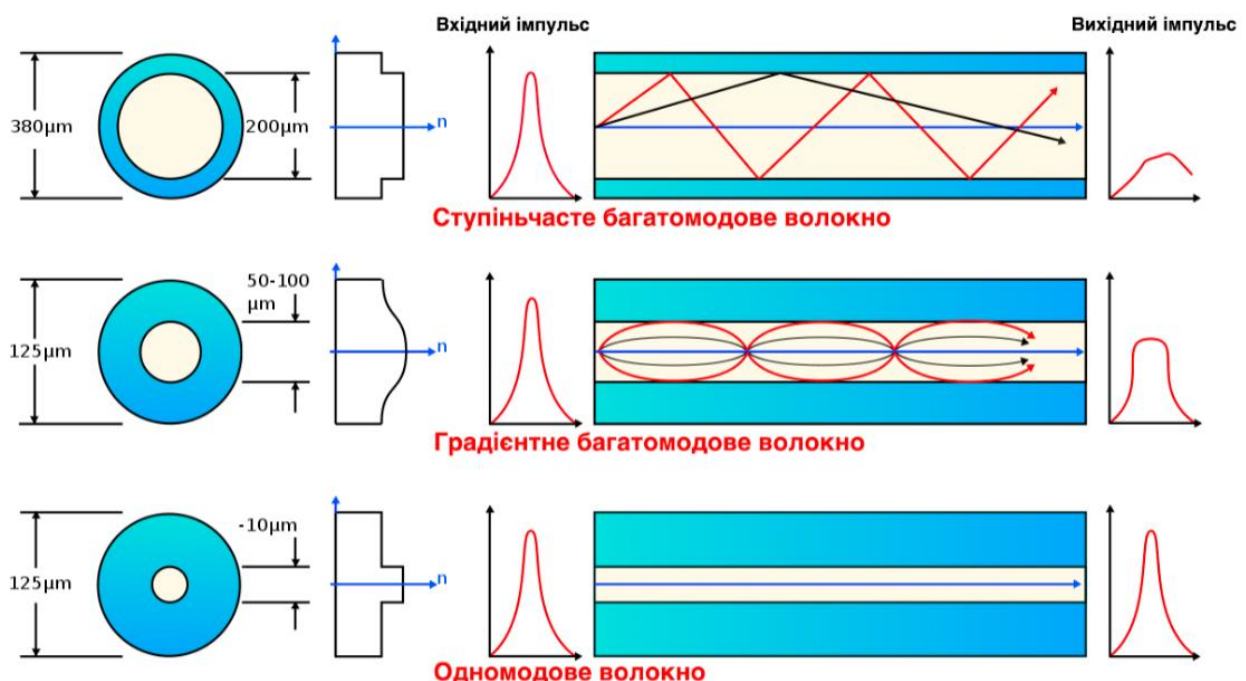


Рисунок 3. – Структура одномодових та багатомодових
волоконно-оптичних кабелів

Волоконно-оптичні кабелі одномодового та багатомодового типу мають відмінні переваги залежно від діаметру сердечника, відстані передачі, пропускної здатності та вартості.

До основних відмінностей одномодових від багатомодовим волоконно-оптичних кабелів можливо віднести наступні:

- ядро – одномодовий кабель має менший діаметр сердечника (близько 9

мікрон), а багатомодовий – має більший (від 50 до 62,5 мікрон);

- відстань передачі – одномодовий кабель може передавати сигнали на великі відстані з мінімальними втратами сигналу, що робить його підходящим для великих відстаней, а багатомодовий – підходить для коротких відстаней у межах кількох сотень метрів;

- пропускна здатність та швидкість передачі даних – одномодовий має вищу пропускну здатність та підтримує швидші швидкості передачі даних порівняно з багатомодовим;

- джерело світла – одномодовий використовує лазерний діод, а багатомодовий – світлодіоди (лазери) як джерела світла;

- вартість – багатомодовий є більш вигідним з фінансової точки зору, ніж одномодовий;

- застосування – одномодовий ідеально підходить для ЛОМ, центрів обробки даних та телекомунікаційних мереж, які вимагають передачі даних на великі відстані, а багатомодовий – підходить для передачі даних високої швидкості у ЛОМ.

Організація комунікацій у ВОЛЗ на основі ЛВ має велику пропускну здатність, яка обумовлена високим значенням несучої частоти та можливістю передачі великих об'ємів даних з великою швидкістю. При цьому, невелика кутова розбіжність ЛВ забезпечує як високу енергетичну стійкість передачі даних по волоконно-оптичному каналу зв'язку при відносно малих габаритах приймально-передавальних пристроїв, так і високу прихованість.

Сутність розробки методу передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології FTTx на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ полягає у наступному. Необхідно передати дані у вигляді декілька електричних інформаційних сигналів, які у кодуєчому пристрої перетворюються до вигляду, зручному для модуляції, після чого надходять у модулятор-підсилювач і, далі, у ланцюг збудження модулятора.

Пристрій формування каналів передачі даних (пристрій) виділяє обрані поздовжні моди (несучі частоти) або комбінації поздовжніх мод (частоти

міжмодових биттів) зі спектра одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ для подальшої модуляції з електричними інформаційними сигналами та формує N каналів передачі даних.

У внутрішньому модуляторі здійснюється обрана модуляція за амплітудою, інтенсивністю, частотою, фазою або поляризацією сигналу несучої частоти або частот міжмодових биттів ЛВ відповідно до електричного інформаційного сигналу.

Модульовані несучі частоти або частоти міжмодових биттів у вигляді сумарного комбінованого сигналу ЛВ обробляються оптичною системою передавача та надсилаються по волоконно-оптичному каналу зв'язку до приймача. Приймальна оптична система фокусує прийнятий сигнал ЛВ на фотоприймач, вихідний електричний сигнал якого обробляється далі для виділення електричного інформаційного сигналу та передачі даних до споживачів.

Використання ЛВ у волоконно-оптичному каналі зв'язку вимагає накладення на несучу частоту сигналу, який містить дані (інформацію, яку необхідно передати). Модуляція ЛВ – це зміна одного або декількох параметрів випромінювання за заданим законом у просторі та/або у часі. Закон зміни модульованого параметра відповідає даним, що передаються (інформації).

Введення даних у ЛВ можливе різними способами. Можливо модулювати сигналом даних (інформаційним) інтенсивність ЛВ (амплітуду), частоту, фазу та поляризацію (рис. 4). Найбільше застосування має амплітудна модуляція через простоту конструкції відповідних пристроїв.



Рисунок 4. Можливі основні види модуляції електричного
інформаційного сигналу у ВОЛЗ

Одним із важливих параметрів модулятора є глибина модуляції, яку
можливо визначити за амплітудним значенням вихідного сигналу:

$$m = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}).$$

До модулюючих пристроїв можливо виділити наступні:

- модулятори – пристрої для зміни за заданим законом у часі одного (декількох) параметрів ЛВ;
- дефлектори – пристрої для зміни у часі положення пучка ЛВ;
- просторово-часові модулятори – пристрої для зміни у часі просторового розподілу інтенсивності, фази або поляризації пучка ЛВ.

Таким чином, формується вихідний комбінований інформаційний сигнал із заданими параметрами модуляції та вихідною потужністю.

За допомогою використання відомих методів активної синхронізації поздовжніх мод одномодового багаточастотного ЛВ можливо досягти високих характеристик вихідного ЛВ та виділити необхідні комбінації несучих частот для подальшої їх модуляції з електричними інформаційними сигналами, тим самим сформуванні декілька каналів передачі даних для технології FTTx.

Отже, для побудови ВОЛЗ перспективним є використання одномодового багаточастотного випромінювання твердотілого (напівпровідникового) лазера, працюючого на основній частоті TEM_{00q} , з синхронізацією поздовжніх мод та стабілізацією частот міжмодових биттів (рис. 5).

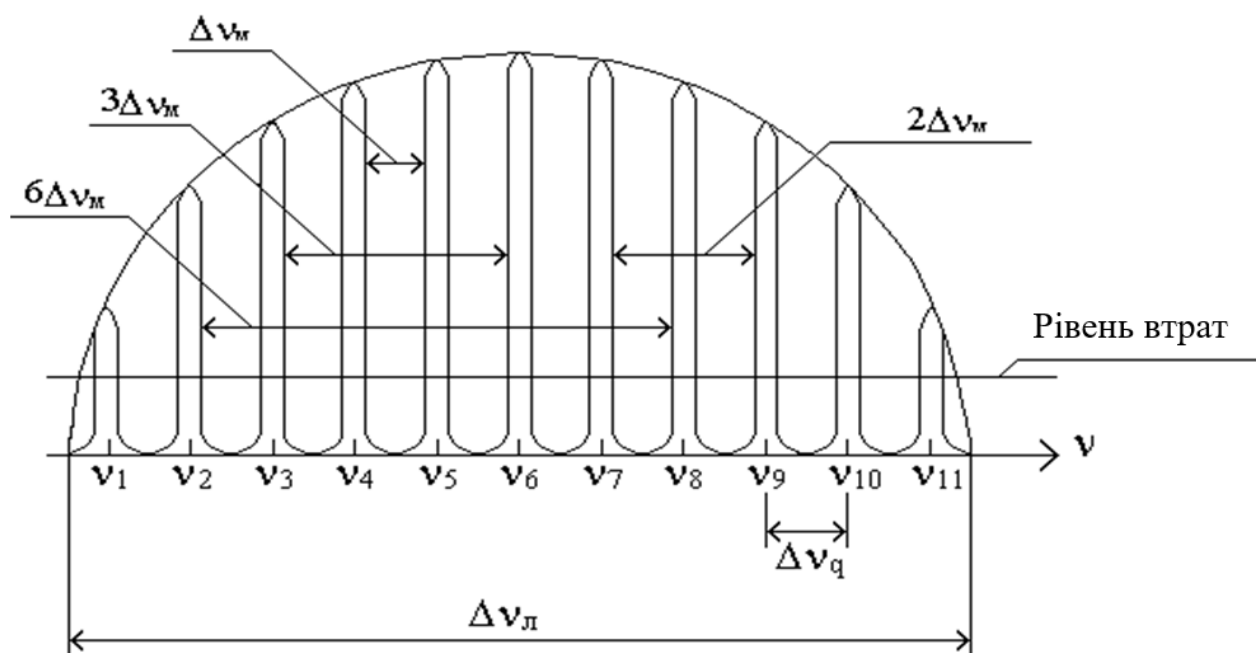


Рисунок 5. Спектр одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ

Самоузгоджені рівняння для частот, фаз та амплітуд багатомодової структури сигналу ЛВ можливо представити у наступному вигляді [158]:

$$A_n + \frac{1}{2} \cdot \frac{\nu}{Q_n} A_n = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\nu}{\varepsilon_0} S_n(t); \quad (1)$$

$$(\nu_n + \phi_n + \Omega_n) A_n = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\nu}{\varepsilon_0} C_n(t), \quad (2)$$

де A_n – амплітуда n -ої моди; Ω_n – частота n -ої моди; ϕ_n – фаза n -ої моди; Q_n – добротність резонатора; C_n – синфазний коефіцієнт поляризації середовища; S_n – квадратурний коефіцієнт поляризації середовища; ν_n – частота міжмодових биттів; ε_0 – напруженість електричного поля.

Пропонується передачу даних у ВОЛЗ для технології FTTx здійснювати як на несучих частотах (поздовжніх модах) [158], так і на частотах міжмодових биттів (комбінаціях поздовжніх мод), які виділяються пристроєм передачі даних (формування каналів передачі даних) зі спектру одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ (рис. 5).

Отже, за умови, коли $S_n(t) = 0$, за виразами (1) та (2) можливо отримати систему виразів для частот ν_n ЛВ багаточастотного лазера, а потім, шляхом попарного віднімання з подальшого попередній вираз, відповідно і для частот міжмодових биттів, які потрібні, надалі, для формування, наприклад, 4-х перших каналів передачі даних:

$$\dot{\psi}_1 = \Delta\nu_{54} = \nu_5 - \nu_4 = \Delta\nu_M, \quad \dot{\psi}_3 = \Delta\nu_{63} = \nu_6 - \nu_3 = 3\Delta\nu_M, \quad (3)$$

$$\dot{\psi}_2 = \Delta\nu_{97} = \nu_9 - \nu_7 = 2\Delta\nu_M, \quad \dot{\psi}_4 = \Delta\nu_{82} = \nu_8 - \nu_2 = 6\Delta\nu_M.$$

де $\dot{\psi}_n$ – частота міжмодових биттів для N вибраних поздовжніх мод.

Рівняння (3) можливо представити у вигляді суми необурених складових,

які залежні від частот міжмодових биттів $\Delta\nu_1, \Delta\nu_2, \Delta\nu_3, \Delta\nu_4$ та обурених малих складових, які обумовлені наявністю сусідніх частот міжмодових биттів та близьких до них комбінаційних частот:

$$\Delta\nu_1 = \Delta\nu_M = \dot{\psi}_1 = A_{10} + \Delta A_{10}(t) + [B_1 + \Delta B_1(t)] \sin(\psi_1 + \Delta\dot{\phi}_1 t + \phi_1),$$

$$\Delta\nu_2 = 2\Delta\nu_M = \dot{\psi}_2 = A_{20} + \Delta A_{20}(t) + [B_2 + \Delta B_2(t)] \sin(\psi_2 + \Delta\dot{\phi}_2 t + \phi_2),$$

$$\Delta\nu_3 = 3\Delta\nu_M = \dot{\psi}_3 = A_{30} + \Delta A_{30}(t) + [B_3 + \Delta B_3(t)] \sin(\psi_3 + \Delta\dot{\phi}_3 t + \phi_3),$$

$$\Delta\nu_4 = 6\Delta\nu_M = \dot{\psi}_4 = A_{40} + \Delta A_{40}(t) + [B_4 + \Delta B_4(t)] \sin(\psi_4 + \Delta\dot{\phi}_4 t + \phi_4),$$

.....

$$\Delta\nu_m = \dot{\psi}_m = A_{m0} + \Delta A_{m0}(t) + [B_m + \Delta B_m(t)] \sin(\psi_m + \Delta\dot{\phi}_m t + \phi_m);$$

$$\Delta\nu_n = \dot{\psi}_n = A_{n0} + \Delta A_{n0}(t) + [B_n + \Delta B_n(t)] \sin(\psi_n + \Delta\dot{\phi}_n t + \phi_n), \quad (4)$$

де $\Delta A_{m0} \ll A_{m0}$; $\Delta B_m \ll B_m$; $\Delta\dot{\phi}_m \ll \dot{\psi}_m$; $m = 1, 2, \dots, n$ – комплексні числа (ΔA_m , $\Delta\dot{\phi}_m$ та ΔB_m).

Спектр одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ містить комбінаційні частоти, близькі до частот $\Delta\nu_1, \Delta\nu_2, \dots, \Delta\nu_n$. З їх частотою змінюються інверсія населеності та амплітуда коливань. Тобто, змінюються коефіцієнти рівнянь системи виразів (4). При переважанні комбінаційної частоти Ω_0 , близькою до частоти міжмодових биттів $\Delta\nu_l$, малі складові першого рівняння (4) можливо розкласти у ряд Фур'є (у комплексній формі) наступним чином:

$$\{\Delta A_{10}; \Delta B_1; \Delta \phi_1\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \{\Delta A_{10}; \Delta B_1; \Delta \phi_1\} e^{ik\Omega_0 t}. \quad (5)$$

Отже, коефіцієнти першого рівняння системи виразів (4) є періодичними функціями часу з періодом:

$$T_0 = 2\pi/\Omega_0.$$

Для першої пари поздовжніх мод:

$$\nu_5 - \nu_4 = \Delta\nu_{54} = \Delta\nu_M,$$

яка виділяється для формування 1-го каналу передачі даних $\Delta\nu_l$, якщо $\psi_1(t)$ є деяке рішення першого рівняння системи (4), то $\psi_1(t + T_0)$, також, буде рішенням такого рівняння, причому:

$$\psi_1(t) - \psi_1(t + T_0) = B_1 \{\sin[\psi_1(t) + \phi_1] - \sin[\psi_1(t + T_0) + \phi_1]\}. \quad (6)$$

Вираз (6) можливо привести до наступного вигляду:

$$\psi_1(t + T_0) - \psi_1(t) = 2\pi k, \quad (7)$$

де $k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm \dots$

З виразу (7), функцію $\psi_1(t)$ можливо представити у вигляді суми двох частин: лінійною за часом функцією та періодичною з періодом T наступним чином:

$$\psi_1(t) = n\Omega_0 t + \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} R_k e^{jk\Omega_0 t}. \quad (8)$$

де R_k – коефіцієнт розкладання, який задовольняє наступній умові:

$$|R_k| \ll 1; k = \pm 1; \pm 2; \pm \dots \quad (9)$$

Наведене вище вказує на те, що нерівність у рівнянні (4) справедлива, якщо виконується наступна умова:

$$B_1; |\Delta B_1|; |\Delta A_1|; |\Delta \dot{\phi}_1| \ll n\Omega_0. \quad (10)$$

Вираз (4) буде стійким за умови, коли він стійкий в усій області існування. Така область може бути визначена, наступним чином:

$$\left| m\Omega_0 - \left(A_{10} - \frac{B_{10}^2}{A_{10}^2} \right) \right| \leq \left[|\Delta B_{1m}|^2 + \left(\frac{B_1}{m\Omega_0} \right)^2 |\Delta A_{1m} + \Delta \dot{\phi}_{1m}|^2 - \right. \\ \left. - 2 \frac{B_{10}}{m\Omega_0} |\Delta B_{1m}| |\Delta A_{1m} + \Delta \dot{\phi}_{1m}| \cos(\chi_m - \chi_{mB}) \right]^{1/2}; \quad (11)$$

де $m=1, 2, \dots, 12$; χ_m та χ_{mB} – фази комплексних чисел $\Delta A_{1m} + \Delta \dot{\phi}_{1m}$ та ΔB_{1m} ;

$$\{\Delta A; \Delta B; \Delta \dot{\phi}\}_m = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \{\Delta A; \Delta B; \Delta \dot{\phi}\}_m e^{-jm\Omega_0 t} dt. \quad (12)$$

Отже, в області частот, що задовольняє співвідношенню (4), існує стійке рішення (11) для усіх рівнянь, що описують режим биття з комбінаційними частотами $n\Omega_0$. Це означає, що поздовжні моди синхронізовані, а частоти міжмодових биттів стабілізовані.

Комбінаційні частоти $n\Omega_0$ близькі до частот $\Delta\nu_1, \Delta\nu_2, \dots, \Delta\nu_n$. При налаштуванні центральної моди поблизу центру спектральної лінії, частоти потрапляють у смугу захоплення та стають синхронізованими. Отже, відбувається стабілізація частот міжмодових биттів.

Отже, виділення з одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ комбінацій поздовжніх мод, необхідних для формування

каналів передачі даних можливо за умови використання різницевих частот міжмодових биттів:

$$\Delta v_{54}=v_5-v_4=\Delta v_m; \quad \Delta v_{97}=v_9-v_7=2\Delta v_m; \quad \Delta v_{63}=v_6-v_3=3\Delta v_m; \quad \Delta v_{82}=v_8-v_2=6\Delta v_m.$$

Таким чином, можливо записати структуру сигналів, що виділяються на виході пристрою передачі даних на частотах міжмодових биттів.

Визначити електричні поля кожної з частот, що виділені першої пари частот міжмодових биттів $\Delta v_{54}=v_5-v_4=\Delta v_m$ можливо за наступною системою рівнянь:

$$E_5(t) = A_5 \sin[2\pi(v_L + 5\Delta v_m)t + \phi_5],$$

$$E_4(t) = A_4 \sin[2\pi(v_L + 4\Delta v_m)t + \phi_4].$$

Результуюче електричне поле сумарної електромагнітної хвилі ЛВ на виході пристрою для першої пари частот міжмодових биттів, що виділена можливо визначити за виразом:

$$\begin{aligned} E_5(t) + E_4(t) = 2A_{54} \sin \frac{2\pi(v_L + 5\Delta v_m)t + \phi_5 + 2\pi(v_L + 4\Delta v_m)t + \phi_4}{2} \times \\ \times \cos \frac{2\pi(v_L + 5\Delta v_m)t + \phi_5 - 2\pi(v_L + 4\Delta v_m)t - \phi_4}{2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Електричне поле різницевої частоти міжмодових биттів першої пари, що виділяється пристроєм, можливо визначити за наступним виразом:

$$E_{54}(t) = 2A_{54} \cos \frac{2\pi\Delta v_m t + \phi_5 - \phi_4}{2} = A_{54} \cos(2\pi\Delta v_m t + \phi_5 - \phi_4). \quad (14)$$

Електричні поля для кожної з частот, що виділені другої пари частот

міжмодових биттів $\Delta v_{97}=v_9-v_7=2\Delta v_M$ можливо визначити за наступним виразом:

$$E_9(t) = A_9 \sin[2\pi(v_L + 9\Delta v_M)t + \phi_9],$$

$$E_7(t) = A_7 \sin[2\pi(v_L + 7\Delta v_M)t + \phi_7].$$

Результуюче електричне поле сумарної електромагнітної хвилі ЛВ на виході пристрою для другої пари поздовжніх мод, що виділена можливо визначити за виразом:

$$\begin{aligned} E_9(t) + E_7(t) = 2A_{97} \sin \frac{2\pi(v_L + 9\Delta v_M)t + \phi_9 + 2\pi(v_L + 7\Delta v_M)t + \phi_7}{2} \times \\ \times \cos \frac{2\pi(v_L + 9\Delta v_M)t + \phi_9 - 2\pi(v_L + 7\Delta v_M)t - \phi_7}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Електричне поле різницевої частоти міжмодових биттів другої пари, що виділяється пристроєм, можливо визначити за виразом:

$$E_{97}(t) = 2A_{97} \cos \frac{2\pi 2\Delta v_M t + \phi_9 - \phi_7}{2} = A_{97} \cos(2\pi 2\Delta v_M t + \phi_9 - \phi_7). \quad (16)$$

Електричні поля для кожної з частот, що виділені третьої пари частот міжмодових биттів $\Delta v_{63}=v_6-v_3=3\Delta v_M$ можливо визначити за наступним виразом:

$$E_6(t) = A_6 \sin[2\pi(v_L + 6\Delta v_M)t + \phi_6],$$

$$E_3(t) = A_3 \sin[2\pi(v_L + 3\Delta v_M)t + \phi_3].$$

Результуюче електричне поле сумарної електромагнітної хвилі ЛВ на виході пристрою для третьої виділеної пари поздовжніх мод можливо визначити за виразом:

$$E_6(t) + E_3(t) = 2A_{63} \sin \frac{2\pi(\nu_L + 6\Delta\nu_M)t + \phi_6 + 2\pi(\nu_L + 3\Delta\nu_M)t + \phi_3}{2} \times$$

$$\times \cos \frac{2\pi(\nu_L + 6\Delta\nu_M)t + \phi_6 - 2\pi(\nu_L + 3\Delta\nu_M)t - \phi_3}{2}. \quad (17)$$

Електричне поле різницевої частоти міжмодових биттів третьої пари, що виділяється пристроєм, можливо визначити за наступним виразом:

$$E_{63}(t) = 2A_{63} \cos \frac{2\pi 3\Delta\nu_M t + \phi_6 - \phi_3}{2} = A_{63} \cos(2\pi 3\Delta\nu_M t + \phi_6 - \phi_3). \quad (18)$$

Електричні поля для кожної з частот, що виділені четвертої пари частот міжмодових биттів $\Delta\nu_{82} = \nu_8 - \nu_2 = 6\Delta\nu_M$ можливо визначити за виразом:

$$E_8(t) = A_8 \sin[2\pi(\nu_L + 8\Delta\nu_M)t + \phi_8],$$

$$E_2(t) = A_2 \sin[2\pi(\nu_L + 2\Delta\nu_M)t + \phi_2].$$

Результуюче електричне поле сумарної електромагнітної хвилі ЛВ на виході пристрою для 4-ої виділеної пари поздовжніх мод можливо визначити за виразом:

$$E_8(t) + E_2(t) = 2A_{82} \sin \frac{2\pi(\nu_L + 8\Delta\nu_M)t + \phi_8 + 2\pi(\nu_L + 2\Delta\nu_M)t + \phi_2}{2} \times$$

$$\times \cos \frac{2\pi(\nu_L + 8\Delta\nu_M)t + \phi_8 - 2\pi(\nu_L + 2\Delta\nu_M)t - \phi_2}{2}. \quad (19)$$

Електричне поле різницевої частоти міжмодових биттів 4-ої пари, що виділяється пристроєм, можливо визначити за виразом:

$$E_{82}(t) = 2A_{82} \cos \frac{2\pi 6\Delta\nu_M t + \phi_8 - \phi_2}{2} = A_{82} \cos(2\pi 6\Delta\nu_M t + \phi_8 - \phi_2). \quad (20)$$

Запропоновано пристрій формування каналів передачі даних на частотах міжмодових биттів, що складається з перших 4-х каналів, кожен з яких, також, містить (рис. 6):

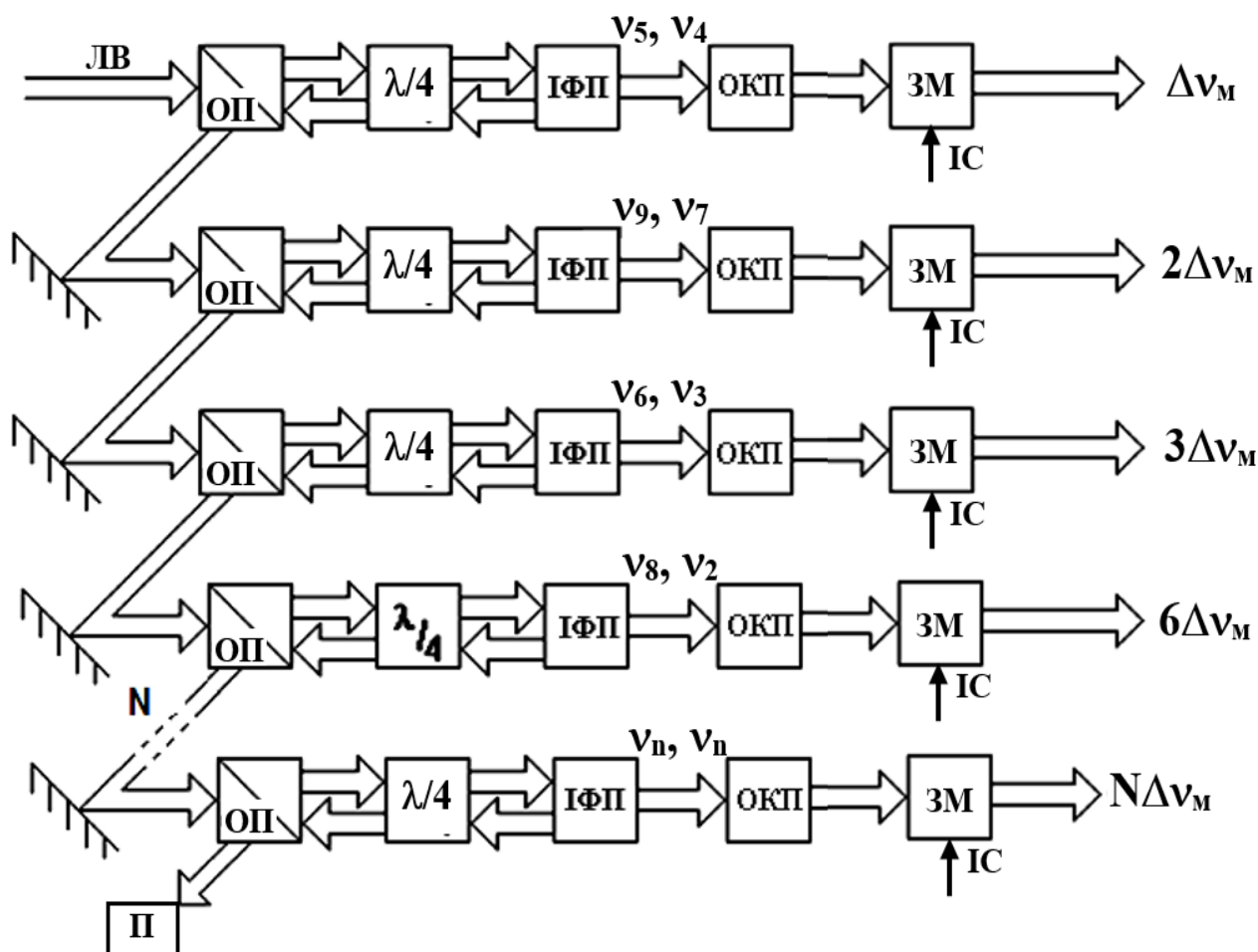


Рисунок 6. Функціональна блок-схема пристрою формування каналів передачі даних на великі відстані на частотах міжмодових биттів ЛВ

- оптичний поляризатор випромінювання (Оп), що призначений для пропускання певної поляризації поздовжніх мод;
- пасивну фазову пластинку ($\lambda/4$), що призначена для повороту вектору E ЛВ, що проходить, на кут 45° за один прохід (у прямому або зворотному напрямках руху);
- вузькосмуговий ІФП, що налаштований на сигнал конкретної комбінації поздовжніх мод (несучих частот) та призначений тільки для її пропуску та відбиття поздовжніх мод, що залишились;

- змішувач (ЗМ), що призначений для модуляції виділеної поздовжньої моди (несучої частоти) з електричним інформаційним сигналом (даними), який надходить через введення ІС;
- оптичний квантовий підсилювач (ОКП), що призначений для підсилення виділеної комбінації поздовжніх мод (несучих частот);
- допоміжні дзеркала, що призначені для каналізації поздовжніх мод ЛВ;
- пастки (П), що призначена для гасіння поздовжніх мод, що залишилися та за своїми вихідними характеристиками непотрібні.

Після Оп виділеної пари поздовжніх мод (несучих частот) ν_8, ν_2 , послідовно підключена решта N каналів передачі даних, кожен з яких складається аналогічним чином, як і попередні.

Робота пристрою формування каналів передачі даних на частотах міжмодових биттів ЛВ полягає у наступному. На вхід пристрою поступає одномодове багаточастотне з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ. Проходячи перший канал через Оп та $\lambda/4$, яка повертає вектор E ЛВ, що проходить, на кут 45° за один прохід, груповий сигнал поздовжніх мод поступає на ІФП.

ІФП пропускає першу пару частот ν_5, ν_4 (рис. 5, 6), яка підсилюється ОКП, змішується з інформаційним сигналом у ЗМ та формує 1-й канал передачі даних.

Частина групового сигналу, що залишилася, яка була відбита дзеркалом ІФП, повертається та обертається фазовою пластиною ще на кут 45° . Виходячи через бічну грань Оп частина групового сигналу спрямовується допоміжним дзеркалом у наступний канал, де відбувається аналогічним чином виділення другої пари поздовжніх мод (несучих частот), необхідних для формування 2-го каналу передачі даних.

Аналогічним чином відбувається виділення і пар поздовжніх мод (несучих частот $\nu_6, \nu_3=3\Delta\nu_m$ та $\nu_8, \nu_2=6\Delta\nu_m$), що залишилися, які необхідні для формування 3-го та 4-го каналів передачі даних.

Виділення поздовжніх мод, необхідних для формування N каналів передачі даних здійснюється наступним чином. Сигнали усіх несучих частот, що

залишилися після виділеної пари поздовжніх мод (несучих частот ν_8, ν_2) спрямовуються допоміжним дзеркалом у наступний канал пристрою, де відбувається виділення двох поздовжніх мод (несучих частот ν_{n1}, ν_{n2}) аналогічним чином, як і для попередніх виділених пар поздовжніх мод.

Кількість каналів передачі даних залежить від попереднього розрахунку кількості поздовжніх мод (несучих частот ν_n), які мають необхідні вихідні характеристики для використання.

Частина сигналу, що залишився, спектр якого розташований нижче рівня втрат, через допоміжне дзеркало спрямовується у «пастку». Тобто, поздовжні моди, випромінювання яких дорівнює рівню втрат спектру ЛВ та невелике за потужністю, – не використовується.

На приклад, удосконалення методу передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології Fiber to the Home (FTTH) полягає у наступному. У відому технологію побудови мережі FTTH, за якої волоконно-оптичний кабель використовується для з'єднання центральної точки з окремими будівлями, введено розроблений пристрій формування каналів передачі даних, що дозволяє, завдяки використанню N несучих частот (багатомодового або багаточастотного) ЛВ збільшити об'єм та підвищити швидкість передачі даних. При цьому, у залежності від відстані між ППМ, можливо обрати варіанти пристрою – або з ОКП для великих відстаней (до 150 км), або без ОКП для відстаней, що складають декілька десятків кілометрів.

До основних варіантів розгортання удосконаленої мережі FTTH можливо віднести наступні: активна оптична мережа (AON, рис. 7), пасивна оптична мережа (PON, рис. 8) та з'єднання «точка-точка» (PTP).

Удосконалена активна оптична мережа – це мережа, яка заснована на архітектурі (структурі) мережі «точка-точка», при якій кожен користувач має спеціальну багатомодову волоконно-оптичну лінію.

За такою мережею у процесі передачі інформаційного сигналу, комутаційні пристрої, такі як маршрутизатори і комутаційні агрегатори, активні оптичні прилади тощо розгорнуті з офісної техніки до підрозділу розподілу

користувачів.

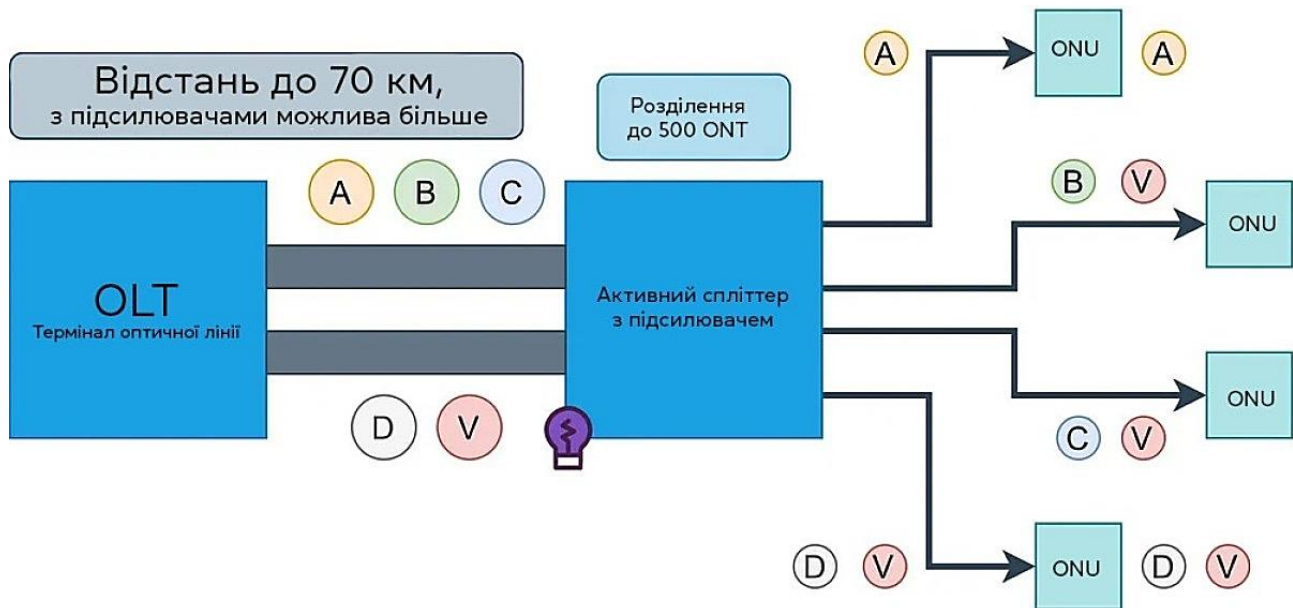


Рисунок 7. Структура активної оптичної мережі

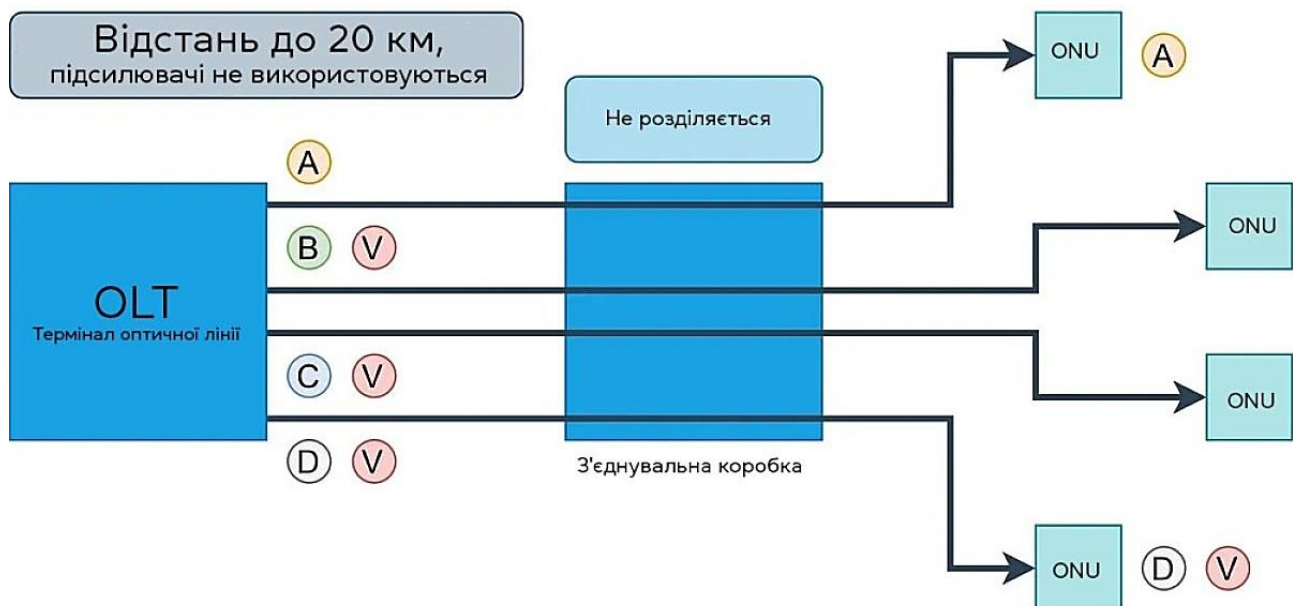


Рисунок 8. Структура пасивної оптичної мережі

Удосконалена пасивна оптична мережа – це мережа, яка заснована на архітектурі (структурі) мережі «точка-багатоточка» та є основною технологією реалізації FTTH. У PON використовується пасивні оптичні розгалужувачі

(оптична мережа розподілу, ODN), що дають змогу однієї магістральної багатомодової волоконно-оптичної лінії обслуговувати декілька кінцевих точок. При цьому, створення такої мережі пов'язане з низькими фінансовими витратами. Тому, для багатьох компаній PON є більш привабливою відносно AON. Максимальна відстань від передавача даних до приймача складатиме 20 км (рис. 8).

До основних компонентів удосконаленої PON можливо віднести наступні: лазер (одномодове багаточастотне з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ), пристрій формування каналів передачі даних, оптичні розгалужувачі та абонентські термінали, що забезпечують високошвидкісну передачу даних на великі відстані:

- термінал оптичної лінії (Optical Line Terminal, OLT) – це центральний вузол PON, який відповідає за управління мережею. Він як передає по N каналам передачі дані на Optical Network Unit (ONU), так і отримує від них у відповідь багаточастотні інформаційні сигнали;

- ONU – кінцева точка клієнта, яка відповідає за перетворення багатомодового ЛВ у електричний багаточастотний інформаційний сигнал, що використовується пристроями клієнта, виступаючи як шлюз;

- оптичний спліттер – це пасивний пристрій, що розділяє вхідне ЛВ на безліч вихідних променів. Тобто, перетворення у електричні багаточастотні інформаційні сигнали не потрібне. До коефіцієнтів поділу належать наступні: 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32 і 1:64, де перше число вказує на кількість вхідних променів, а друге – на кількість вихідних.

Сутність удосконаленої технології PON полягає у наступному. Клієнти підключаються до OLT через ONU, як описано вище. Перша частина з'єднання, від OLT до спліттера, є фідером, до складу якої входять багатомодові волоконно-оптичні нитки, що з'єднують OLT зі сплітером. Друга частина, що йде від спліттера до ONU та позначає кінець з'єднання є розподільчою мережею, до складу якої входять багатомодові волоконно-оптичні нитки, що з'єднують спліттер з ONU. Завдяки принципу роботи спліттера усі клієнти, під'єднані до

одного фідера та мають однакову пропускну здатність (отримують однакові дані). Призма, що знаходиться всередині ONT у поєднанні з криптографією фільтрує усю нерелевантну інформацію. Це суттєвою відмінністю удосконалених PON від AON, де кожен клієнт має свою власну виділену багатомодову волоконно-оптичну лінію від спліттера і далі.

Удосконалена AON є гнучким та високоефективним типом мережі, до основного складу якого входять компоненти (що дають змогу керувати маршрутизацією та підсиленням інформаційного сигналу):

- підсилювачі – це пристрої, що використовуються для підсилення інформаційного сигналу у аналоговому (цифровому) вигляді. За їх допомогою збільшується потужність (амплітуда) ЛВ, що проходять по багатомодовому волоконно-оптичному кабелю. Вони відіграють найважливішу роль у забезпеченні цілісності та якості сигналів на великих відстанях. Підсилювачі встановлюються у важливих місцях уздовж волоконно-оптичної мережі, щоб компенсувати втрати енергії та загасання сигналу, які відбуваються в міру проходження інформаційного сигналу по волоконно-оптичному кабелю;

- транспондери – це пристрої, що використовуються для перетворення багатомодового ЛВ (оптичних сигналів) у електричні інформаційні сигнали (дані) на приймальному боці та зворотно на передавальному боці – завдяки пристрою формування каналів передачі даних, що важливо для процесів маршрутизації, необхідних у AON. Вони забезпечують зв'язок між оптичними та електронними компонентами у мережі. При передачі даних транспондер, до складу якого входить пристрій формування каналів передачі даних, отримує електричний інформаційний сигнал, перетворює його на оптичний сигнал (багатомодове ЛВ) для передачі за багатомодовим волоконно-оптичним кабелем, а потім, на приймальному кінці, перетворює отриманий оптичний сигнал (багатомодове ЛВ) зворотно у електричний інформаційний сигнал для обробки електронним обладнанням та отримання даних;

- модулятори (ЗМ) – це ключові компоненти, що входять до складу пристрою формування каналів передачі даних та використовуються для

маніпулювання характеристиками оптичних сигналів (багатомодового ЛВ) за різними цілями. Вони модулюють інтенсивність, фазу та поляризацію (за вибором) оптичного сигналу (багатомодового ЛВ) у відповідь на електричний вхід.

Сутність удосконаленої технології AON ідентична PON: OLT є центральною точкою та відповідає за управління мережею та ONU є кінцевою точкою у будівлі (місці призначення), що перетворює оптичний сигнал (багатомодове ЛВ) у електричний інформаційний сигнал для подальшого отримання даних, а також використання пристроями клієнта та зворотно.

Відмінність AON від PON полягає у тому, що відбувається під час передачі даних (на етапі спліттера). У AON наявний пасивний спліттер PON замінюється активним компонентом (комутатором або маршрутизатором).

Комутатор (маршрутизатор) працює з електричними інформаційними сигналами, а не з багатомодовим ЛВ. Вхідне багатомодове ЛВ перетворюється після прийняття у електричний інформаційний сигнал. Пакет даних може бути перевірений та перетворений зворотно перед відправкою до приймача (споживача, клієнта).

Такий підхід дає змогу збільшити пропускну здатність «спліттерного» компонента за допомогою використання спеціальних протоколів (модуляцій) на стороні OLT, зверненої до клієнта, які видаляються перед надсиланням даних клієнту. До того ж, у удосконалених AON на відміну від PON, один OLT може обслуговувати понад 500 окремих ONT та, відповідно, будівель.

Удосконалені мережі AON та PON мають «фідерне» з'єднання, проміжний активний (пасивний) пристрій та кінцеві багатомодові волоконно-оптичні нитки до місця призначення. При цьому, РТР описує пряме з'єднання від аванпосту провайдера до клієнта без будь-яких перешкод на шляху (спліттер). Використовуються OLT та ONU. Жодних спеціальних активних пристроїв не задіяно.

Сутність удосконаленої технології мережі «точка-точка» полягає у наступному. OLT направляє багатомодове ЛВ на ONU, який перетворює його на

багаточастотний електричний інформаційний сигнал, що є відмінністю від удосконаленої PON, де сигнал розділяється на декілька променів та відправляється на ONU. При цьому, клієнт підключається виділеним багатомодовим волоконно-оптичним каналом та не ділить смугу пропускання з іншими сторонами. За таким підходом здійснюється поділ даних між клієнтами, що актуально у регіонах із жорсткими вимогами до конфіденційності даних.

До основних відмінностей даних трьох удосконалених технологій можливо віднести наступні:

- витрати у мережі – це витрати на живлення обладнання та його обслуговування. Удосконалена PON дешевше у експлуатації порівняно з удосконаленою AON, оскільки вимагає менше активних компонентів, меншого обслуговування та працює за загальною інфраструктурою. Вартість удосконаленої PTP дорівнює вартості удосконаленої AON через надлишкову кабельну інфраструктуру;

- покриття за дальністю. Удосконалена AON – є найкращим варіантом для покриття великих відстаней (понад 70 км для фідера та 20 км для розподільчої мережі). Удосконалена PON обмежено 20 км для фідера та розподільчої мережі, що еквівалентно і значенням для удосконаленої PTP;

- розділення багаточастотного інформаційного сигналу. Удосконалена PON – єдина технологія, яка оптично розділяє багатомодове ЛВ на декілька оптичних променів, а потім направляє їх до пристроїв ONU. У удосконаленої AON використовується загальний підхід щодо маршрутизації за допомогою комутаторів та маршрутизаторів, що є суттєвою відмінністю. Удосконалена PTP не передбачає поділу, оскільки багаточастотний сигнал відправляється на ONU;

- пропускна спроможність за високим навантаженням. Удосконалені AON та PTP (кращі варіанти) – надають виділені багатомодові волоконно-оптичні лінії кожному клієнту. Удосконалена PON обмежена загальною інфраструктурою, що знижує пропускну спроможність при високому навантаженні;

- безпека. Удосконалена AON забезпечує кращу безпеку, ніж

удосконалена PON, тому що забезпечує наскрізне шифрування та аутентифікацію, у той час як удосконалена PON забезпечує шифрування тільки у напрямку низхідного потоку. Удосконалена PTP є кращім варіантом. Однак, якщо враховувати той факт, що структура ЛВ, яка використовується є багатомодовою (багаточастотною), то завдяки використанню відомих методів шифрування за частотами можливо забезпечити потрібну безпеку передачі даних для удосконалених AON, PON та PTP.

Таким чином, до основних переваг використання удосконаленої кабельної ВОЛЗ для технології FTTx на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ відносяться наступні:

- висока швидкість передачі даних (висока пропускна здатність у одному каналі передачі даних із N каналів, що забезпечує декілька терабіт за секунду) на великі відстані (рис. 9);
- мінімальні втрати інформаційного сигналу на великі відстані;
- надійний захист від несанкціонованого доступу до даних, що передаються та перехоплення конфіденційної інформації та перешкодостійкість;
- мінімальне електроспоживання для передачі даних порівняно з традиційними методами передачі даних, такими як мідні кабелі;
- мінімальні втрати, так як ВОЛЗ не нагрівається при передачі даних;
- висока стійкість до зовнішніх впливів, таких як: електричні перешкоди, коливання температури та вологості, що дозволяє їм працювати надійно протягом довгого часу без необхідності у ремонті або заміні;
- висока стійкість до зношування, що забезпечує їх довговічність;
- універсальність у застосуванні при різних погодних умовах (висока та низька температура) тощо.



Рисунок 9. Пропускна здатність волоконно-оптичного кабелю з багатомодовою структурою ЛВ

За умови, якщо монтаж удосконаленої ВОЛЗ проведено відповідно до усіх технічних вимог, то вона забезпечить високі якості зв'язку та стійкість до електромагнітних перешкод, а також широку пропускну здатність (рис. 10). З точки зору фінансових витрат монтаж ВОЛЗ легко окупається за рахунок функціональних переваг даного типу телекомунікацій.

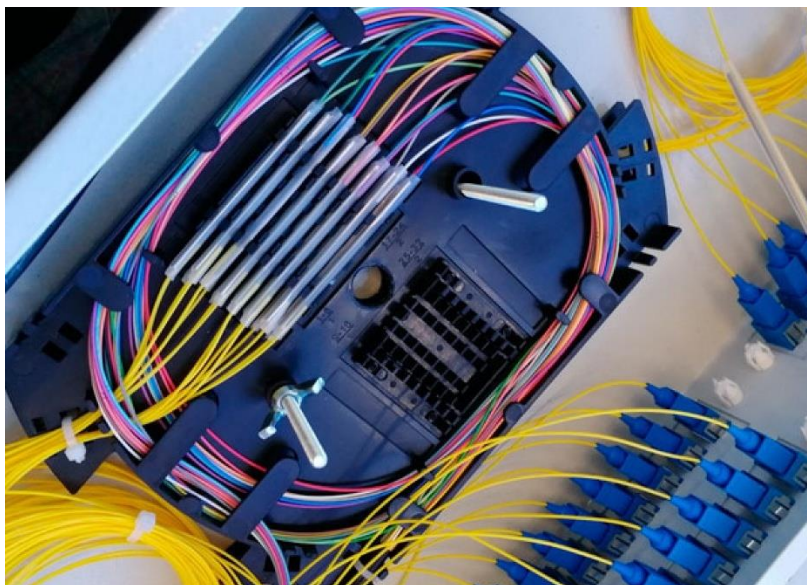


Рисунок 10. Монтаж ВОЛЗ

При цьому, волоконно-оптичному кабелю не загрожує окислення, він не

сприйнятливий до зовнішніх електромагнітних перешкод та не створює перешкод для сусідніх кабелів. Такий кабель має підвищений рівень захисту – його неможливо прослухати, а фізично підключитися до нього непомітно не вийде – одразу спостерігається погіршення якості сигналу, що буде відразу виявлено. Кабель не становить небезпеки при виникненні пожеж та у разі інших змін параметрів навколишнього середовища.

Однак, при монтажі ВОЛЗ слід враховувати й ряд її недоліків. Перш за все це крихкість самого волокна, яка при перегині може призвести як до погіршення якості їх передачі даних, так і поломки. При розриві відновити кабель «на ходу» не можливо – оптичне волокно потребує зварювання (наявність спеціальних пристроїв та досвідчених спеціалістів).

Коли монтується волоконно-оптичний кабель, прокладка впливає на силову конструкцію зі сталі, кевлару або укріпленого пластику. У разі перевищення допустимого рівня натягу кабелю може статися пошкодження волокна. Аналогічна ситуація з мінімальним радіусом вигину – щоб уникнути неполадок у роботі кабелю, необхідно робити плавні вигини та уникати гострих кутів.

Перш, ніж розпочати будь-які роботи з монтажу ВОЛЗ, необхідно візуально впевнитись у цілісності волоконно-оптичного кабелю та відсутності будь-яких зовнішніх пошкоджень. Для перевірки коротких відрізків кабелю на безперервність волокна можливо використовувати звичайні ліхтарики.

Також, слід вивчити лінію, якою здійснюватиметься прокладання ВОЛЗ, та виключити потенційно небезпечні елементи (гострі кути тощо). Після цього, монтажник ВОЛЗ повинен розподілити кабельну лінію з урахуванням того, щоб у місцях встановлення підсилювачів та у точках, де буде проводитися зварювання ВОЛЗ, був доступний запас волоконно-оптичного кабелю.

При цьому, на усіх відкритих кінцях кабелів мають бути надіти водонепроникні захисні ковпачки. За умови, якщо застосовується стандартне прокладання, то волоконно-оптичний кабель укладається безпосередньо у кабельний лоток з барабана.

При монтажі ВОЛЗ волоконно-оптичний кабель укладається у лоток. При цьому, головне дотримати параметри механічного навантаження та мінімального радіуса вигину. Також, важливо не допустити перетину з іншими кабельними лініями та тиску на кабель.

За умови, якщо проектування ВОЛЗ здійснюється з кабелями з кінцевим закладенням, то необхідно приділити особливу увагу акуратному поводженню з роз'ємами: не можна допустити їх забруднення, механічне пошкодження та надмірних навантажень у області з'єднання.

Коли волоконно-оптичний кабель укладено у лоток, то його слід закріпити за допомогою нейлонових стяжок, щоб уникнути його сповзання та провисання. У деяких випадках, неможливо використовувати спеціальні кріплення для кабелів. Тому, як альтернативу, можливо застосувати хомути із захисним пластиковим покриттям. При цьому, кожним хомутом можливо зафіксувати лише один кабель, а не стягувати кілька кабелів відразу.

У разі пошкодження волоконно-оптичного кабелю під час монтажу необхідно помітити цей відрізок та залишити запасне опто-волокно, зварювання якого допоможе виправити дефект.

Дотримання перелічених рекомендацій дозволить зробити якісний монтаж волоконно-оптичного кабелю та забезпечити стабільну та надійну роботу удосконаленої ВОЛЗ.

Висновки. Таким чином, розроблено метод передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології FTTx на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ.

Доведено структуру технології FTTx та розкрито особливості кабельної ВОЛЗ. Технологія FTTx забезпечує високу якість зв'язку, яка необхідна для сучасних цифрових сервісів. Вона вважається найперспективнішою для побудови мереж майбутнього. Попри високу початкову вартість, її переваги у довгостроковій перспективі значно переважають недоліки.

Волоконно-оптичний кабель відноситься до пасивних елементів ВОЛЗ. Головна функціональна частина кабелю – тонка скло-волоконна жила, покрита

захисним шаром зовнішньої оболонки. Кабель ВОЛЗ ділиться на два основні види – багатомодові кабелі, де світловий сигнал поширюється хвилеподібно зі стабільною швидкістю, що забезпечує відмінні властивості імпульсу та одномодові кабелі, де промені світла витягуються у пряму лінію, завдяки чому імпульс отримує практично ідеальні характеристики.

Розроблено пристрій передачі даних для технології FTTx. Пристрій виділяє подовжніх моди зі спектру одномодового багаточастотного з синхронізацією подовжніх мод ЛВ та модулює лазерні сигнали, що випромінюються на комбінаціях несучих частотах з електричними інформаційними сигналами, що дозволяє створити загальну систему збільшення об'єму та підвищення швидкості багатоканальної передачі даних до споживачів.

Отримані аналітичні вирази для розрахунку результуючих електричних полів частот міжмодових биттів (комбінацій подовжніх мод), а також їх амплітуди, які дозволяють врахувати виділені подовжні моди, їх глибину модуляції, частоту та фазу.

Розкрито сутність удосконалення методу передачі даних у кабельній ВОЛЗ для технології FTTH. При виборі типу удосконаленої мережі AON, PON та PTP, необхідно враховувати наступне: послуги мережі, загальну топологію та вимоги споживачів. Тому, для операторів можливо застосовувати поєднання одразу декількох мереж. При цьому, у мережевих архітектурах будь-яка багатомодова ВОЛЗ може бути використовуватися по черзі за різними типами удосконалених мереж. Використання в удосконаленій технології FTTH пристрою формування каналів передачі даних дозволяє також зробити виділені (приватні) канали.

Виділений канал Інтернету – це рішення для різного роду компаній (підприємств тощо), які потребують стабільного та безперебійного доступу до мережі. На відміну від широкосмугового зв'язку, який може пропонувати швидкість до 1 Гбіт/с, виділений канал гарантує постійну пропускну здатність, незалежно від завантаженості мережі та кількості підключених користувачів. Такий підхід може бути ключовою технологією для бізнесів, які працюють з великими об'ємами даних (критичними процесами для підприємств тощо).

Розкрито особливості монтажу удосконаленої ВОЛЗ. Надані рекомендації загального характеру по монтажу, що дозволить зробити якісний монтаж волоконно-оптичного кабелю та забезпечити стабільну та надійну роботу удосконаленої ВОЛЗ.

SECTION 5. INFORMATICS, COMPUTING AND AUTOMATION

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.5.1

5.1 Simulation of visualization processes of ram management via VN network

One of the problems in studying operating systems is that the processes taking place during their operation are invisible to the human eye [165]. Therefore, it is relevant to visualize the processes in the computer when the operating system is running. Consequently, it is necessary to develop appropriate approaches and models to improve the learning process.

A VN network has been developed to simulate the execution of the process and the allocation of the necessary RAM. The VN network is a triple [166],

$$VN = (R, D, F)$$

R is the set of informational positions (nodes), $R = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9, r_{10}\}$; D is the set of transitions, $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6\}$; F is the set of functions assigned to transitions, $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6\}$.

Each process has an m marker, $m \in M$. Each marker has four attributes. The first attribute is the pending time, the second is the active time, the third is the requested memory size, and the fourth is the priority. These attributes are arguments for the transition functions.

The VN network contains ten types of information positions (Fig. 1). The position of the first type (r_1) contains markers corresponding to the processes entered into the system. The position of the second type (r_2) contains markers corresponding to the processes ready to be executed. In this position, the markers are ordered on a FIFO basis if the processes have equal priorities, or by priority if the processes have unequal priorities.

The third position (r_3) contains markers corresponding to the processes to which the RAM area will be allocated according to the "First suitable" strategy. The fourth position (r_4) contains markers corresponding to the processes to which the RAM area will be allocated according to the "Most suitable" strategy. The fifth position (r_5) contains markers corresponding to the processes to which the RAM area will be

allocated according to the "Less suitable" strategy.

The sixth position (r_6) contains markers corresponding to the process in progress. The position of the seventh type (r_7) contains markers corresponding to processes that have left the system.

The position of the eighth type (r_8) contains markers corresponding to the processes that released the occupied memory area because the quantum of time allocated for their execution has expired. The position of the ninth type (r_9) contains markers corresponding to the processes by which the freed memory area should be combined with a non-neighboring area. The position of the tenth type (r_{10}) contains markers corresponding to the processes by which the freed memory area should be combined with the neighboring area.

The VN network contains six types of transitions. On the first type of transition (d_1), function f_1 works, which places markers in position r_2 according to the FIFO principle, if the markers have the same priorities, or places them according to priority if the markers have unequal priorities. The function checks the pending time for each marker. Depending on it, the marker is moved to position r_2 , that is, it is placed in the queue of ready processes.

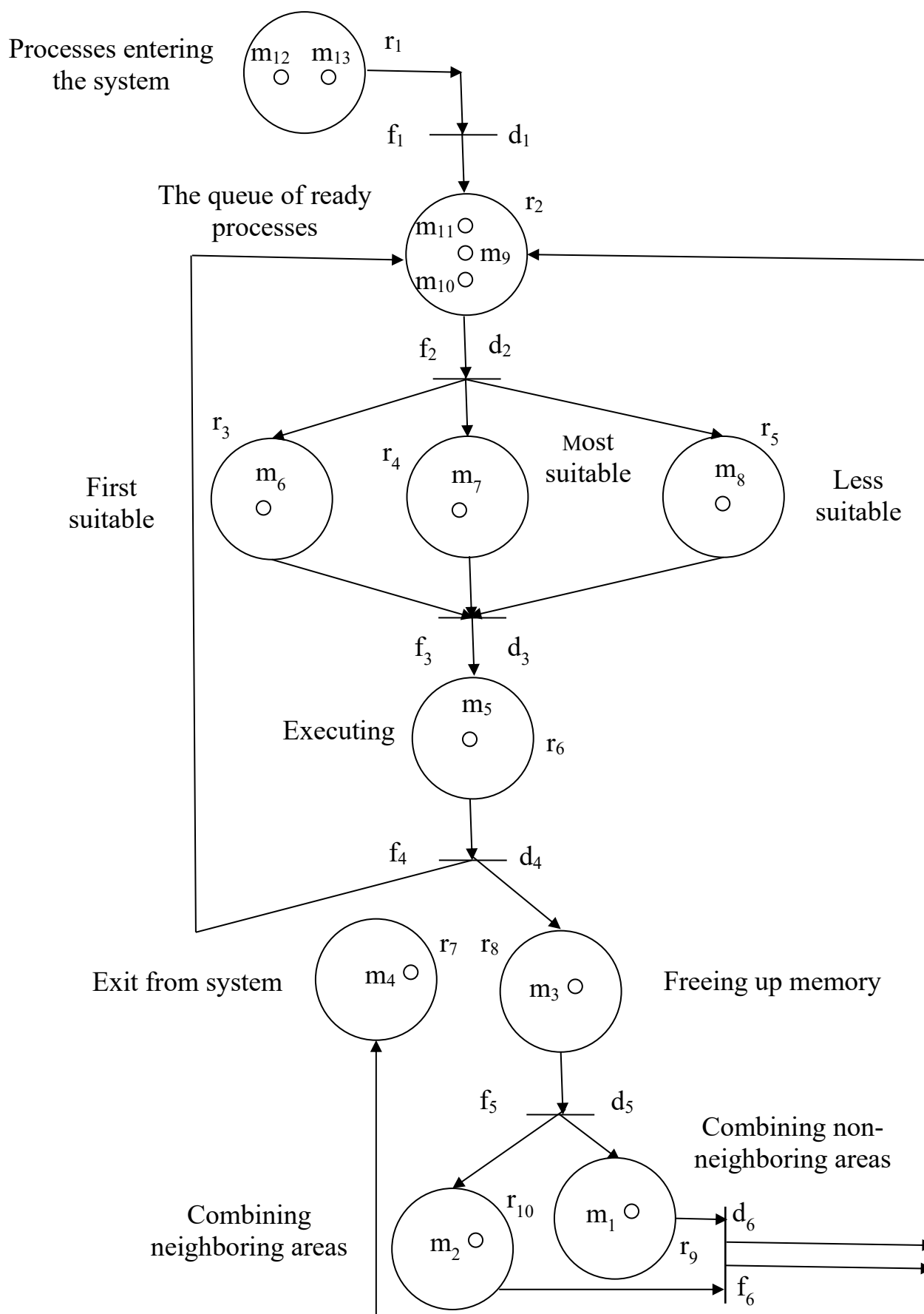


Figure 1. The VN-Network

On the second type of transition (d_2), the function f_2 works, which selects the marker corresponding to the first process from position r_2 (from the queue of ready processes) and places it in position r_3 , r_4 , or r_5 . It depends on the memory allocation strategy. The function checks the value of the T_q quantum. If $T_q = 0$, then the first marker in the sequence is moved to position r_3 , r_4 , or r_5 .

On the third type of transition (d_3), the f_3 function works, which puts markers from positions r_3 , r_4 , or r_5 to position r_6 , as soon as a RAM area is allocated to the corresponding processes. Processes start executing.

On the fourth type of transition (d_4), the function f_4 works, which reduces the time quantum T_q by one unit. As soon as the quantum runs out, the marker moves to position r_8 .

On the fifth type of transition (d_5), the f_5 function works, which sends the marker to the r_9 or r_{10} position. It depends on which area of memory was freed. If there is a free area next to the freed area, then the marker will move to position r_{10} ; otherwise, to position r_9 .

On the sixth type of transition (d_6), the function f_6 works, which combines adjacent or non-adjacent areas of memory and sends the marker to the position r_7 . The simulation process ends when the last element of the sequence contains "*".

To simulate RAM management, we must make the following assumptions. [167-168]: a) We know the entry time of each process in the system; b) We know when and how much memory each process requires; c) We know the size of the memory allocated by the operating system for the process.

Taking into account these assumptions, we can present the pending processes in the form of the following sequence:

$P_1(t_{o1}, t_{a1}, z_1)$	$P_2(t_{o2}, t_{a2}, z_2)$	$P_3(t_{o3}, t_{a3}, z_3)$	$\dots$	$P_i(t_{oi}, t_{ai}, z_i)$	*

Each process has the following features: pending time, active time, requested memory size, and priority. As we can see, the first element of the sequence contains information about the first process, the second element - about the second process, and so on. Here, P_i is the identifier of the process i . t_{pi} is the pending time of the P_i process.

t_{ai} — the time during which the process P_i occupies the area of memory with the size of z_i . Consider an example. Suppose we have the following sequence of processes:

$P_1(0,3,100)$	$P_2(0,1,250)$	$P_3(2,5,230)$	$P_4(1,2,110)$	$P_5(0,1,180)$	*

" $P_1(0,3,100)$ " is placed in the first element of the sequence. This means that process P_1 requests 100 units of memory during 3 units of time and gets it if there is a free memory area of the appropriate size. 100 units can be 100 kilobytes or 100 megabytes, etc. Process P_1 is placed in the queue of ready processes immediately because its pending time is 0. Process P_2 also enters the system immediately, which requests 250 units of memory for 1 unit of time. The P_2 process gets it if there is a free area of this size. Otherwise, the process waits for an area of the required size to be freed. After 2 units of time, process P_3 enters the system. After another 1 unit of time has passed, process P_4 enters the system. Along with process P_4 , process P_5 also enters the system because its pending time is equal to 0. As soon as 3 units of time allocated to process P_1 expire, it releases the 100 units of memory it occupies and exits the system.

Algorithms for RAM allocation between processes have been developed for cases when processes have equal and unequal priorities. A set of algorithms has been developed for both cases: $L = \{ L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7 \}$.

Here, L_1 is the algorithm for executing the process from the moment it enters the queue of pending processes until the execution is completed, L_2 is a memory allocation algorithm for a process based on the "First suitable" principle, L_3 is a memory allocation algorithm for a process according to the "Most suitable" discipline, L_4 is an algorithm for allocating memory for a process according to the "Least suitable" discipline, L_5 is an algorithm for freeing memory by the process, L_6 is an algorithm for combining two free adjacent areas of memory, and L_7 is an algorithm for combining non-adjacent free areas of memory.

Assume the processes have equal priorities: $\Pi_1 = \Pi_2 = \dots = \Pi_l$. Accordingly, the processes included in the list of ready processes are queued according to the FIFO discipline. First, let us consider the L_2 algorithm for allocating memory according to the "First suitable" discipline for a process. It consists of the following steps:

1. Sorting of free memory areas according to increasing F_n starting addresses will be performed.
2. The size z_n of the process P_i will be compared to each element of the set of sizes of free areas - $\{ F_1, F_2, F_3, \dots, F_j \}$.
3. The first acceptable one is selected from the set - F_m , the size of which is greater than or equal to the size of the process P_n , $F_1 \geq z_n$.
4. The P_i process will be allocated an area of size F_1 , the starting address of which is $A_{in} = F_{i1}$, and the last address is $A_{fi} = A_{in} + z_n - 1$.
5. The size of the remaining free memory will change - $F_k = F_k - z_n$. Its initial address will be $F_{i1} = A_{fn} + 1$, and the last address F_{fi} will remain the same.

Consider the L3 algorithm for allocating memory according to the "Most suitable" discipline for the process. It consists of the following steps:

1. Free memory areas are sorted in ascending order of starting addresses F_i .
2. The differences between the size of each free area and the size of a given process are calculated, $D_k = F_k - z_n$. A set of differences is obtained: $\{ D_1, D_2, D_3, \dots, D_j \}$.
3. The P_n process will be allocated a region of minimum size:
 $F_{\min_k} = \min \{ D_1, D_2, D_3, \dots, D_j \}$.
4. The P_n process is allocated an area of size F_k , the starting address of which is $A_{in} = F_{ik}$, and the last address will be $A_{fn} = A_{in} + z_n - 1$.
5. The size of the remaining free memory will change - $F_k = F_k - z_n$. Its starting address will be $F_{ik} = A_{fn} + 1$, and the last address will remain the same $F_{fk} - k_n$.

Consider the L4 algorithm for allocating memory according to the "Least suitable" discipline for the process. It consists of the following steps:

1. Free memory areas are sorted according to increasing F_i starting addresses.
2. The differences between the size of each free area and the size of a given process are calculated, $D_k = F_k - z_n$. A set of differences is obtained $\{ D_1, D_2, D_3, \dots, D_j \}$.
3. The P_i process will be allocated the maximum size area:
 $F_{\max_k} = \max \{ D_1, D_2, D_3, \dots, D_j \}$.

4. The P_i process is allocated an area of size F_k , whose starting address is A_{in}
 $= F_{ik}$, and the last address is $A_{fn} = A_{in} + z_n - 1$.

5. The size of the remaining free memory will change - $F_k = F_k - z_n$. Its
starting address will be $F_{ik} = A_{fn} + 1$, and the last address F_{fk} will remain the same.

Consider the L_5 algorithm for freeing memory by the process. It consists of the
following steps:

1. A new area will be added to the set of sizes of the free area F , the size of
which is equal to the size of the process P_i , and A_{in} and A_{fn} , are the start and last
addresses, $F_{ik} = A_{in}$ and $F_{fk} = A_{fn}$, $F_k = z_n$.

2. It is checked whether, as a result of freeing the memory area, two
neighboring areas were placed next to each other or not.

3. If two free memory areas are adjacent to each other, then the L_6 algorithm
starts working.

Consider the L_6 algorithm for the combining of two free neighboring areas. It
consists of the following steps:

1. The last address of the first free area will be compared with the starting
address of the second free area. If the last address is one more than the first, then these
two free areas are adjacent to each other - $F_{ks} = F_{k-1b} + 1$.

2. They are combined, that is, the addresses are rearranged. In particular, the
starting address of the first neighboring area remains the same, and the last address of
the second area will become the last address of the first area, $F_{k-1i} = F_{kf}$.

Consider the L_7 algorithm for the combining non-adjacent free areas of memory.
It consists of the following steps:

1. The starting address of the first free area of memory will be compared to
the starting address of the memory area occupied by each process. The area whose
address is closest to the starting address of the first free area is selected. Also, the
starting address of the free area must be less than the starting address of the area
occupied by the process, $A_{in} > A_{ik}$.

2. These two memory areas swap places, which is done by changing their
start and last addresses: $A_{in} = F_{ik}$, $A_{fn} = A_{in} + z_n - 1$, $F_{ik} = A_{fn} + 1$, $F_{fk} = F_{ik} + F_k - 1$.

3. This process is repeated until two free areas are found next to each other. In this case, the L_6 algorithm of combining two neighboring free areas starts working.

4. The mentioned three steps are repeated until one area of the memory remains free.

Consider the L_1 algorithm. It consists of the following steps:

1. From the queue of pending processes, the corresponding elements of the P_n process will be read. If its pending time is zero, $t_{pn} = 0$, then it is placed in the ready processes list (queue). If $t_{pn} \neq 0$, then it remains in the pending process queue until the pending time expires.

2. It is checked if the last element of the sequence is "*". If there is, it means that we have no more pending processes. Otherwise, proceed to the 3rd step.

3. The P_n process is placed at the end of the list of ready processes.

4. All the above steps are repeated for each process.

5. If process P_n is first in the list of pending processes and the operating system has enough memory to allocate for it, then it will be allocated an area of size z_n in memory.

6. At this moment, the L_2 , L_3 , or L_4 memory allocation algorithm for the process starts working.

7. Steps 5 and 6 are repeated for each process. As a result, the memory area allocated for processes will be filled.

8. After that, the count of time starts. The activity time of each process t_{an} simultaneously decreases by a unit of time until the activity time of one of them expires, $t_{an} = 0$.

9. If $t_{an} = 0$, then P_n frees the occupied memory area and exits the system.

10. The L_5 algorithm for freeing memory by the process starts working.

11. It is checked whether there are free neighboring areas in the memory. If there is, then the L_6 algorithm of combining two free neighboring areas starts working.

12. The list of ready processes is checked. If there is a process in it, it checks if there is a free area in memory to place it. If there is, then the process will be placed in memory. If it is not, then the combining free non-adjacent areas of memory is

completed, i.e., the L_7 algorithm starts working. If there is still no free memory area of sufficient size, then the process remains on the list of ready processes.

13. If there is at least one process in memory, then proceed to the 8th step. Otherwise, the algorithm stops working.

For processes with unequal priority, $\Pi_1 > \Pi_2 > \dots > \Pi_l$. Accordingly, the processes included in the list of ready processes are queued according to priority. The above algorithms are valid even in the case of unequal priorities.

Based on the proposed visualization model and the presented algorithms, the corresponding software training system and the corresponding graphic interface are realized. In the first window of the simulator (Fig. 2), the student selects the number of processes, their priorities, the amount of memory they should occupy, as well as active time and pending time. In this case, we have five processes that have equal priority. The student chooses one of the strategies for allocating processes in memory and the amount of memory allocated to processes. These settings can also be generated with a random number generator. Then, the student chooses the process execution mode: automatic or step-by-step. In the case of automatic mode, the interval for changing the state of the process is indicated, for example, 5 seconds. This means that after every 5 seconds, a change of situation will be made: memory allocation/release by a process, or combining neighboring/non-neighboring free areas. Here, the student chooses an interval that makes it easier for him to observe the memory. In step-by-step mode, the situation changes every time the student presses the "Next" button (Fig. 3 - 5).

#1				–	☐	☒
Number of processes	5	Memory size	700	Strategy		
				Most suitable		
Processes	Priorities		Pending time	Activity time	Requested memory	
P ₁	1		0	4	160	
P ₂	1		0	3	150	
P ₃	1		0	8	130	
P ₄	1		0	5	110	
P ₅	1		1	7	120	
Next	End	Generate				
☐	Auto mode	5 sec.	☒	Step mode		

Figure 2. The first window of the software simulator.

# 2						–	☐	☒		
		Set of pending processes: P ₁ (0,4,160) P ₂ (0,3,150) P ₃ (0,8,130) P ₄ (0,5,110) P ₅ (1,9,120) *								
		List of ready processes *								
RAM		Memory allocation table								
Free memory - 700		F _i	F _f	F		A _i	A _f	Z	t _A	P
		1	700	700						
Next	End	Generate								

Figure 3. Formation of a set of pending processes.

# 3									
		Set of pending processes: P5(1,9,120) *							
		List of ready processes: P1(0,4,160) P2(0,3,150) P3(0,8,130) P4(0,5,110) *							
RAM		Memory allocation table							
Free memory - 700		F_i	F_f	F		A_i	A_f	Z	t_A P
		1	700	700					
Next		End		Generate					

Figure 4. Formation of the list of finished processes.

# 4									
$t_{A3} = t_{a3} - 2 =$ $2 - 2 = 0,$ $t_{p10} = t_{p10} - 2 =$ $1 - 2 = 0$		Set of pending processes: P ₅ (1,9,120) *							
		List of ready processes: P ₂ (0,3,150) P ₃ (0,8,130) P ₄ (0,5,110) *							
RAM		Memory allocation table							
P ₁ - 160		F_i	F_f	F		A_i	A_f	Z	t_A P
		161	700	540		1	160	160	4 P ₁
Free memory - 540									
Next		End		Generate					

Figure 5. The first process occupies an area of the requested size in memory.

At the start of work, the sequence elements of each process are blue. The moment the element is read, it starts to flash. When a process is in the list of ready processes, then the corresponding item turns yellow. If the process is present in the list of pending

processes, then the corresponding item turns red. When a process occupies memory, the corresponding item is green. Free areas are white.

Thus, the monograph offers algorithms for visualizing RAM management processes, using which it is possible to simulate RAM allocation strategies: "first suitable", "most suitable", and "least suitable". Algorithms are developed for processes with equal and unequal priority. To simulate the mentioned processes, the VN network is used, which provides the possibility of visualizing several functions performed by the operating system. Based on the VN network, RAM management processes are simulated and visualized. Based on the algorithms mentioned, a software training system is built, which provides the opportunity to teach the processes of RAM allocation effectively. As a result, the student sees the running processes on the screen, changes the parameters, observes the obtained results, and actively participates in the process of studying the mentioned issues.

5.2 Моделювання синхронізації двигуна за допомогою тригерних підсистем

У цьому розділі надано методологічні основи побудови моделі двигуна внутрішнього згоряння у пакеті Simulink системи комп'ютерної математики Matlab та показано, як змодельовати чотирициліндровий двигун внутрішнього згоряння з іскровим запаленням від дросельної заслінки до виходу колінчастого валу. Використовуються певні фізичні принципи, доповнені, де це доречно, емпіричними співвідношеннями, які описують динамічну поведінку системи, не вносячи непотрібних складнощів. Аналіз та фізика У цьому прикладі описуються концепції та деталі, пов'язані із створенням моделей двигунів, з акцентом на важливі методи моделювання Simulink. Базова модель використовує розширені можливості Simulink для захоплення подій, що базуються на часі, з високою точністю. У рамках цього моделювання запускається підсистема моделює передачу паливоповітряної суміші з впускного колектора в циліндри за допомогою дискретних подій клапана. Це відбувається одночасно з безперервними процесами впускного потоку, створення моменту, що крутить, і прискорення. Друга модель додає додаткову тригерну підсистему, яка забезпечує керування частотою обертання двигуна із зворотним зв'язком за допомогою приводу дросельної заслінки. Ці моделі можна використовувати як автономне моделювання двигуна. Або їх можна використовувати в рамках більшої системної моделі, такої як інтегроване моделювання транспортного засобу та трансмісії, при розробка системи контролю тяги.

Ця модель заснована на опублікованих результатах Кросслі та Кука (1991). Описується моделювання чотирициліндрового двигуна внутрішнього згоряння із іскровим запалюванням. Робота Кросслі та Кука також показує, як моделювання, засноване на цій моделі, було перевірено на цих випробуваннях на динамометричному стенді. У наступних розділах (наведених нижче) аналізуються ключові елементи моделі двигуна, виявлені Кросслі та Куком:

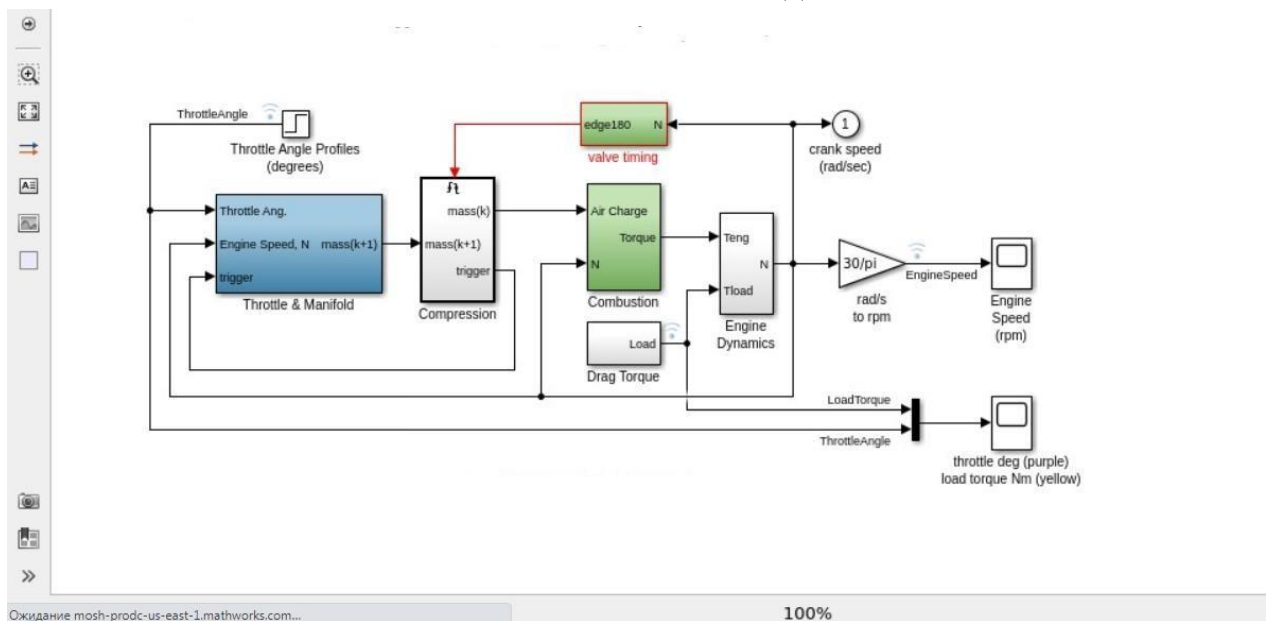
1. дросель;
2. впускний колектор;

3. масова витрата;
4. хід стиснення;
5. генерація крутного моменту та прискорення.

Примітка. До моделі можна додати додаткові компоненти, щоб забезпечити більшу точність моделювання і більше точно відтворити поведінку системи.

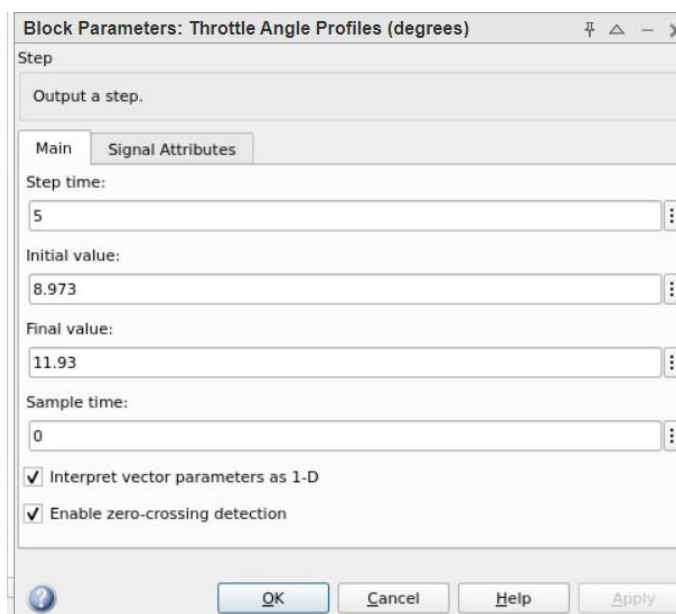
Загальна схема моделі

Рис. 1 Загальна схема моделі



Послідовність побудови моделі двигуна для подальшої симуляції процесів.

1. Блок Step. Профілі кута дросельної заслонки (градуси).



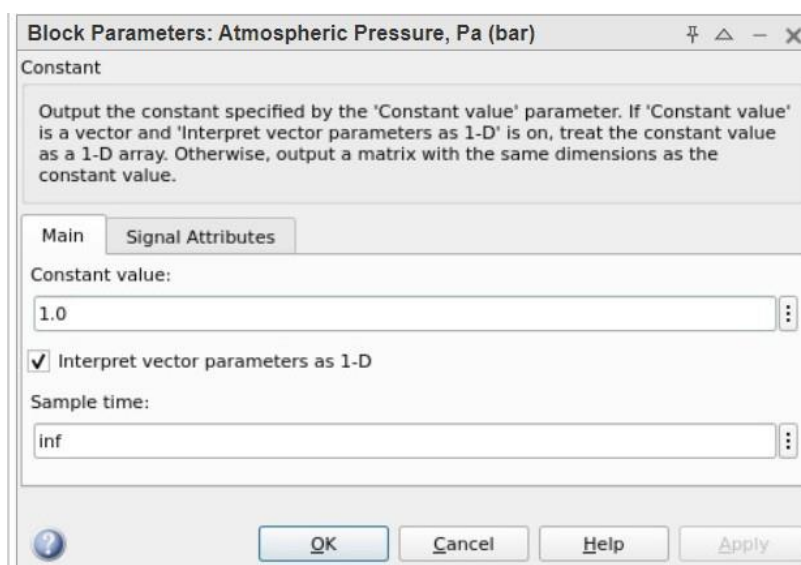
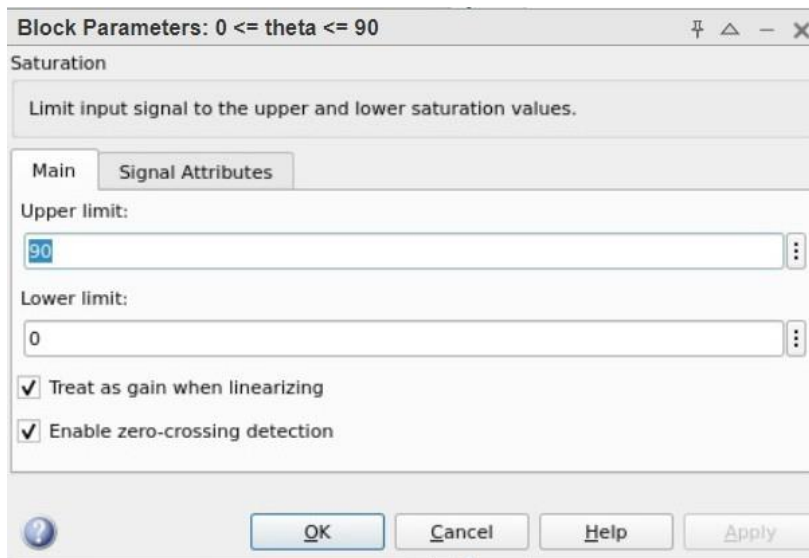
Signal attributes: double

2. Блок Subsystem - блок підсистеми 1 назвемо Throttle & Manifold (Дросель і колектор) Параметри блоку залишити за замовчуванням.

Зайти у підсистему поставити три Inport - Throttle Ang., Engine Speed, N, trigger (Дросель, Частота обертання двигуна, тригер (імпульс, збудження)).

Outport – надати ім'я mass (k+1)

2.1 Поставити блок Saturation та блок Constant на входи вкладеної підсистеми 1.1 (Дросельна заслонка) – зміна кута theta від 0 до 90 градусів та Atmospheric Pressure, Pa (bar) (Атмосферний тиск)



2.2 Додати блок Subsystem підсистеми 1.1, увійти та додати в ній три

входи Inport.

2.3 З другого входу підсистеми 1 додати блок Subsystem підсистеми 1.2 (Впускний колектор).

2.4 Вхідні та вихідні порти у двох підсистемах назвати згідно схеми, що розташована нижче.

➤ **Throttle Flow vs. Valve Angle and Pressure:**

Inport:

Throttle Angle, θ (deg)

Manifold Pressure, P_m (bar)

Atmospheric Pressure, P_a (bar)

Outport:

Throttle Flow, $\dot{m}$ (g/s)

Intake Manifold Vacuum:

Inport:

$\dot{m}$ Input (g/s)

N (rad/sec)

Outport:

Manifold Pressure, P_m (bar)

$\dot{m}$ to Cylinder (g/s)

Витрати потоку дросельної заслінки в залежності від кута клапана та тиску:

Входи:

Кут дросельної заслінки, θ (град.)

Тиск у колекторі, P_a (бар)

Атмосферний тиск, P_a (бар)

Виходи:

Потік дросельної заслінки, $\dot{m}$ (г/с)

Вакуум во впускном коллекторе:

Входи:

ввод $\dot{m}$ (г/с)

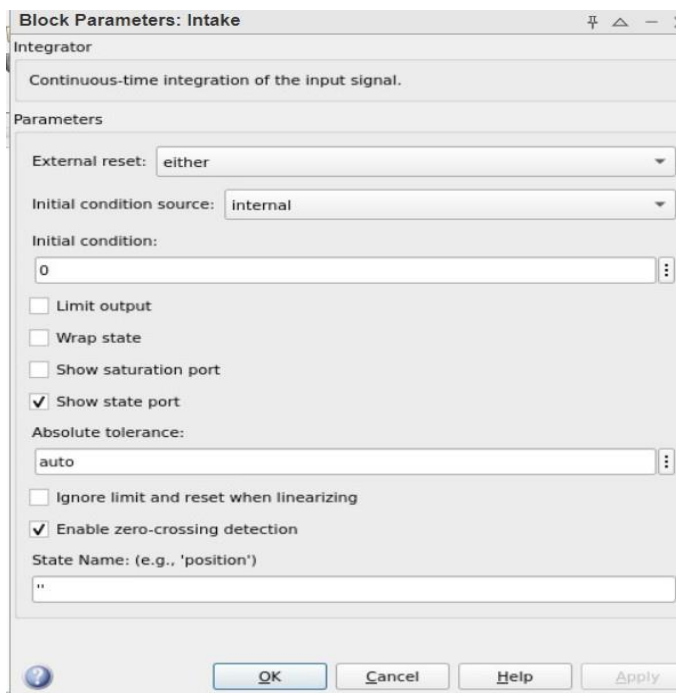
N (рад/сек)

Виходи:

Тиск у колекторі, Па (бар)

$\dot{m}$ до циліндру, (г/с)

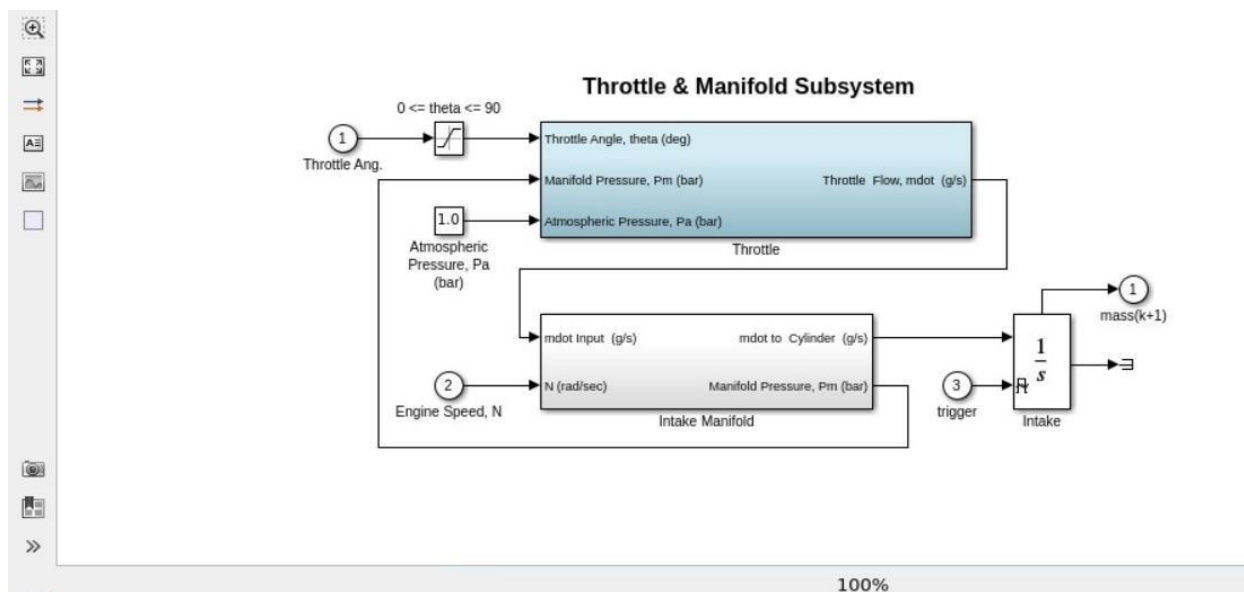
2.5 Після третього входу додати блок Integrator, який назвати Intake (Впуск). Параметри блоку:



При встановленні параметру External Reset – either (Зовнішній зброс – або) у блоці будуть два входи та позначка.

2.6 Додати блок Terminator – використовується для закінчення вихідних сигналів.

➤ **Схема першої підсистеми 1 моделі включає ще дві вкладені підсистеми 1.1 та 1.2**



3. У зовнішній моделі поставити другий блок Subsystem – підсистема 2 Compression – Стиснення з входами та виходами відповідно до схеми.

Inport: mass (k+1), Triggerport

Тригер (тригерна система) - клас електронних пристроїв, що мають здатність довго перебувати в одному з двох стійких станів і чергувати їх під впливом зовнішніх сигналів. Кожен стан тригера легко розпізнається за значенням вихідної напруги. За характером дії тригери відносяться до імпульсних пристроїв - їх активні елементи (транзистори, електронні лампи) працюють у ключовому режимі, а зміна станів триває короткий час.

Відмінною особливістю тригера як функціонального устрою є властивість запам'ятовування двійкової інформації. Під пам'яттю тригера мають на увазі здатність залишатися в одному з двох станів і після припинення дії перемикаючого сигналу. Приймавши один із станів за «1», а інший за «0», можна вважати, що тригер зберігає (пам'ятає) один розряд числа, записаного в двійковому коді.

Блок Trigger додає зовнішній сигнал або порт повідомлення для керування виконанням підсистеми чи моделі. Щоб увімкнути цю

функціональність, додайте цей блок до Subsystem або на кореновому рівні моделі, на яку посилаються в блоці Model . Потім налаштуйте блок Trigger для виконання підсистеми або моделі:

Один раз на кожному часовому кроці, коли значення сигналу, що управляє, змінюється вказаним вами способом.

Кілька разів протягом тимчасового кроку, коли сигнал керування є подією виклику функції з діаграми Stateflow®, блоку Function-Call Generator або блоку S-Function на основі повідомлень, отриманих у порту керування.

➤ Встановіть, як сигнал керування запускає виконання

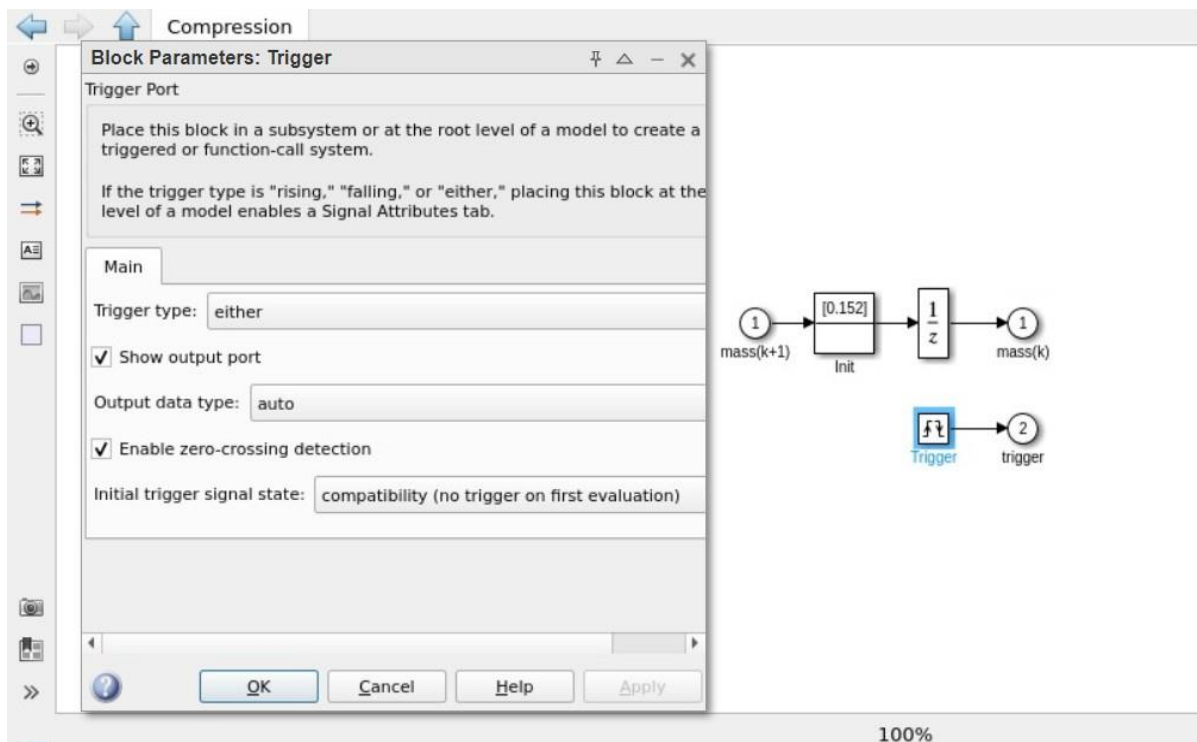
Відкрийте блок subsystem, а потім відкрийте діалогове вікно параметрів для блоку Trigger port. У списку Тип тригера виберіть:

rising - Запустити виконання підсистеми, коли керуючий сигнал зростає від негативного або нульового значення до позитивного значення.

falling - Тригерне виконання підсистеми, коли керуючий сигнал падає з позитивного або нульового значення до негативного значення.

either - Запустить виконання підсистеми за допомогою зростаючого або падаючого керуючого сигналу.

Налаштування Triggerport.



Output: 1. mass (k), 2. trigger.

4. Додати блок Subsystem – підсистема 3 Combustion - Горіння з двома входами (Inport) та одним виходом (Outport).

Inport:

Air Charge - Повітряний заряд

N – engine angular speed - кутова швидкість двигуна Outport:

Torque - Обертаючий момент

5. Додати блок Subsystem – підсистема 4 Engine Dynamics – Динаміка двигуна з двома входами (Inport) та одним виходом (Outport).

Inport:

Teng - Тен Tload

Outport: N – engine angular speed - кутова швидкість двигуна

6. Додати блок Subsystem – підсистема 5 valve timing – фази газорозподілу з одним входом (Inport):

N – engine angular speed - кутова швидкість двигуна та одним виходом (Outport):

edge 180.

7. Додати блок Subsystem – підсистема 6 drag torque – зміна обертаючого моменту з одним виходом (Outport): Load – завантажити.

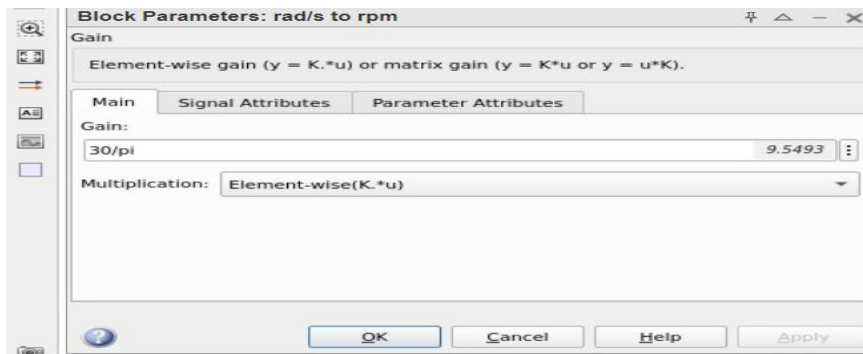
8. З'єднати всі елементи зовнішньої моделі та підсистеми згідно першій схемі.

9. Додати блок Outport - cranc speed, швидкість обертання колінчатого валу, для преднання тієї моделі до інших моделей автотранспортних засобів.

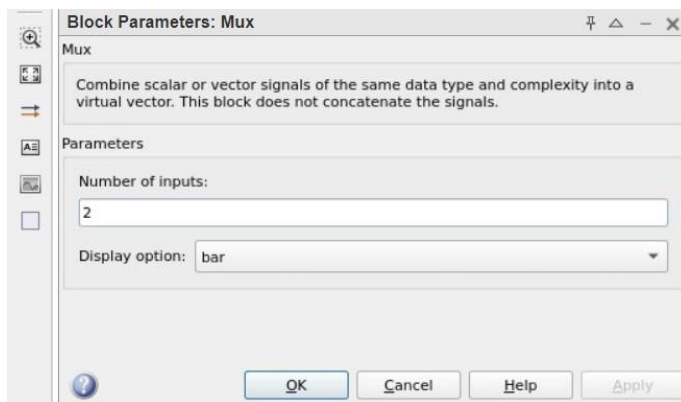
Додаючи блоки, з'єднувати їх згідно зовнішньої першої схеми.

10. Додати блок Gain – rpm, кількість обертів.

RPM означає кількість обертів за хвилину і використовується як міра того, наскільки швидко працює будь-яка машина в даний момент часу. В автомобілях обороти вимірюють, скільки разів колінчастий вал двигуна здійснює один повний оборот за хвилину, а також скільки разів кожен поршень піднімається і опускається в циліндрі.



11. Додати блок Max з двома входами та одним виходом, до якого підходять отримані значення – момент навантаження та кут дросельної заслінки.



12. Додати два осцилографа для виведення графіків:
блок Scope – Engine speed, швидкість двигуна,
блок Scope – throttle deg, load torque, дросельна заслінка, момент навантаження.

Ми побудували загальну схему синхронізації двигуна, яка включає шість підсистем.

5.3 Neural networks as a necessary component for modern methods of searching for anomalies in video sequences

To control various processes and objects in order to prevent a wide range of risks and dangers, video surveillance systems are widely used, i.e. complexes of technical equipment and software designed to monitor the course and behavior of these processes and objects. This is a slightly supplemented formulation of the essence of the video surveillance process from work [174].

Such processes and objects can be, for example, cars moving along a street or a country road, road surface during control of its condition and quality, a security system for any object, including the “Smart Home” system, and much more.

Anything that differs from the usual course or behavior of the observed processes or objects is an anomaly in the video sequence of surveillance cameras. An anomaly in the video sequence of surveillance cameras is usually a sign of violations or danger in the observed processes or objects. But, for example, in video surveillance in industry during technological processes, an anomaly can be evidence of violations or safety precautions, or a certain technology, that is, be useful information. Search and registration or detection of anomalies is the main goal of video surveillance.

A review of modern systems for detecting anomalies in video footage of video surveillance cameras has been conducted.

An analysis of methods for detecting anomalies in video footage of video surveillance cameras has been conducted. For this purpose, a classification of traditional modern methods for detecting anomalies in video footage has been developed and the foundations of the theory of neural networks and convolutional neural networks have been considered from the point of view of their application for classification, localization, segmentation, detection, identification and tracking of objects in video footage of surveillance cameras.

The formation of an input data set for conducting experiments on detecting anomalies in the video sequence of surveillance cameras is considered and a

methodology for comparative experiments on searching for anomalies in the video sequence of surveillance cameras is developed.

An anomaly of a time series in general, and the video sequence belongs to such series, is, as this very word indicates, something that differs from the norm, that is, an outlier or deviation. The search for anomalies is a scientific direction of enormous scope, which concerns many branches of science and technology.

As for anomalies in the video sequence of surveillance cameras, they can belong to useful information, that is, be evidence of some violations in the normal course of the observed processes. In this case, the registration or detection of anomalies is the main goal of video surveillance. Anomalies in the video series of surveillance cameras can also be caused, for example, by equipment malfunctions or interference in the signal transmission path from video cameras to recording and analytical equipment. Of course, such anomalies are not informative, and the causes of their appearance must be eliminated.

Recently, many different methods of detecting anomalies in time series in general, and in video series of video surveillance cameras in particular, have appeared in the world information space. Many articles devoted to research in this direction have appeared, mostly in English. Although among their authors there are many researchers from Asian countries. These articles are mostly very vague, many are overviews. It is very difficult to obtain really useful practical information from them. Apparently, software developers for intelligent IP video cameras and video information processing systems carefully protect their developments.

On the other hand, some general-purpose software companies, such as Microsoft, publish computational schemes for processing video data, test suites, machine learning programs, etc. In general, these are huge amounts of computational and video information. Researchers and developers of modern video surveillance systems find it difficult to navigate this variety of methods for detecting anomalies.

During video surveillance, information is transmitted from video cameras and television cameras to a certain number of monitors or recording devices. Video surveillance systems are used in places that require constant supervision, such as banks,

ATMs, train stations, airports, military facilities, vehicles and transportation systems, private houses and apartments, shopping malls and regular stores, etc.

In industry, surveillance cameras can be used for centralized monitoring of the production process or in the presence of an environment that is dangerous to humans. Video surveillance systems can record continuously or be turned on only after a given event. More advanced surveillance systems using video recorders allow you to create recordings that will be stored for years, with different quality and with additional features (such as motion detection and email notifications) [175].

A video sequence is a product of the action of video cameras of a surveillance system and refers to time series, the study of which, including their anomalies, has been devoted to a lot of work. But the study of anomalies in video sequences themselves is not so much.

Usually, a video sequence is considered as a sequence of frames, and significant changes from one frame to another may indicate the emergence of new situations, and this is considered as a way out of the state of stability, that is, as an anomaly.

We have analyzed a considerable number of scientific works that consider problems related to the study of video sequences. These are not only video cameras used for video surveillance in security systems, but also those video cameras used in many other areas of human activity. These are defense, industry, medical research, agriculture, various scientific research, including space, and many others.

The large volume of video data that has been produced recently and continues to be produced continuously requires automated processing using powerful computers, specialized software, and the latest intelligent information technologies. Currently, the role of humans in analyzing video sequences from the point of view of searching for anomalies is practically minimized. This is explained by both the large volume of video data that requires analysis and the low capabilities of humans compared to computing equipment (speed of operation, vision features, etc.).

The system for detecting anomalies in video sequences or a video surveillance system functions as follows. The video sequence, that is, the useful signal from the

video camera, which is the result of video surveillance, enters the video recorder or computer for registration, further processing, and storage.

A video recorder is an electronic device designed to record, store, and play video information [176]. It is similar in structure to a computer or video server and contains an analog-to-digital converter (ADC), processor, hard drive and other components. A specialized operating system is installed on it to control the video recorder. Before recording, digitized video images are usually compressed to reduce the space occupied on the hard drive. Almost all video recorders can work with both monochrome and color video images. Many video recorders have the ability to connect to a computer network to transmit video images to computers of remote users.

In the case of using a video recorder, video processing is carried out in the video processing unit. This process of processing video sequences in order to detect threats or anomalies in conjunction with appropriate software is called video analytics and can be implemented both by separate devices and by computer or video recorder software. The results of video analytics or the video itself can be transmitted to the Internet using an Internet connection unit.

Now autonomous controlled robotic rotating Internet Protocol (IP) video surveillance cameras have appeared on the market, which allow remote or automatic rotation of the lenses horizontally and vertically to increase the volume of the monitored space, for example, Hikvision DS-2DF8C448I5XS-AELW (Fig. 1) [177].

Such a video camera is controlled in an application for smartphones and tablets or in the software for the video surveillance system itself.



Figure 1. Hikvision robotic pan/tilt IP video camera
DS-2DF8C448I5XS-AELW with video analytics
and Internet connectivity [177]

Such devices are wireless and can transmit video online via the Internet in real time, as well as record an archive to the cloud or to a memory card with a capacity of up to 256 GB. This is a modern self-sufficient tool for video surveillance, which has video analytics software and does not require additional equipment. Surveillance cameras of this type, manufactured by well-known companies, cost 100 thousand hryvnias or more per unit. Therefore, such cameras are not yet very common, but practice proves that in the future such devices will become cheaper and will be widely used in video surveillance systems.

For a robotic IP video camera with video analytics, the functional block diagram of the anomaly detection system in the video sequence looks like this (Fig. 2):

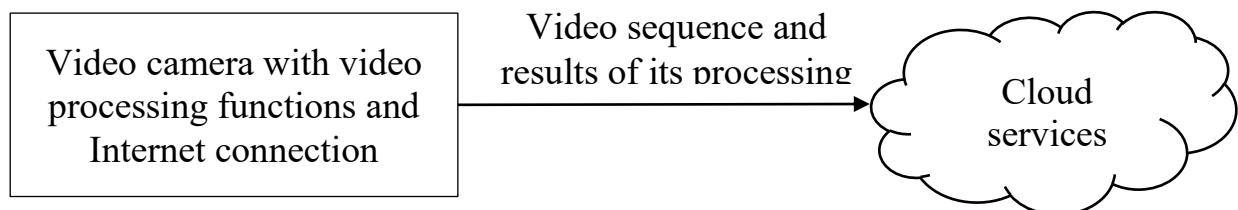


Figure 2. Diagram of the anomaly detection system in the
video sequence with combined functional blocks

Such a video surveillance device can independently store a certain amount of video information, can transfer it for storage using cloud technologies. This video camera can also process the received video information using certain algorithms independently (within its capabilities), and can transfer it for cloud computing if more powerful computing resources are required.

The above-mentioned state-of-the-art systems for detecting anomalies in video sequences are still a thing of the future. Therefore, the task of classifying a somewhat simpler traditional technique, which is now predominantly used in anomaly detection systems in video sequences at the present time, continues to be relevant.

It is customary to distinguish several types of classic video surveillance systems depending on the technical equipment used [178, 179].

1) Analog systems. Components: AHD/HD-CVI/HD-TVI video surveillance camera, Digital Video Recorder (DVR).

2) Digital systems. They are based on IP technology. The abbreviation IP (Internet Protocol) indicates a collection of rules by which Internet technology must be used to exchange information between computer networks. This refers to the use of IP video cameras in conjunction with network switches. The composition of components: IP video surveillance camera, Network Video Recorder (NVR) and a network switch for connecting video cameras and video recorders to the Internet.

3) Mixed (hybrid) systems. The principle of their operation is based on receiving video images from analog cameras and digitizing the image for further use.

Analog systems are not very modern, but sometimes the use of this type of system is justified [178].

Digital systems today are more promising compared to analog systems: improved video image quality, flexibility and easy scalability, the possibility of deep analysis and remote configuration, ease of integration into an existing computer network.

Hybrid systems are so far the most common. In them, the quality of the received image is inferior to systems with a digital format, but other parameters of the operation

of systems of this type do not differ from similar characteristics of digital systems, and this makes it possible to create reliable and multifunctional systems of a mixed type.

It should be noted that modern video surveillance systems necessarily use the Internet and for this purpose have in their composition either video cameras and video recorders for receiving, recording and saving video images, as well as a router and a control unit for all video cameras, or one network IP video camera for small areas or local tasks. To transmit video information simultaneously from several points, a video surveillance system can consist of several network video cameras.

Let us try to clearly present the classification of anomaly detection systems in the video sequence, based on the above-mentioned classes of these systems (Fig. 3) [180].

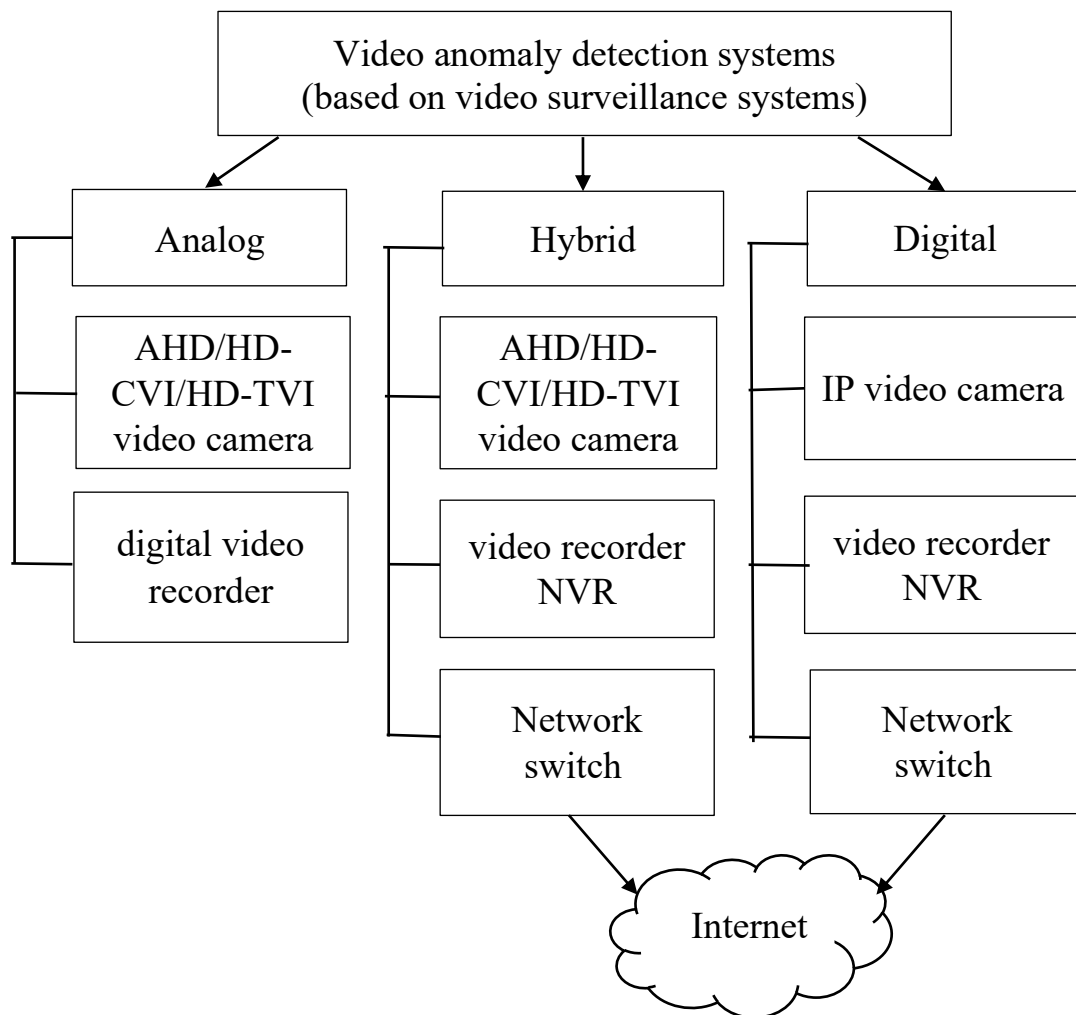


Figure 3. Classification scheme of anomaly detection systems
in surveillance camera video sequences

The above analysis shows that for modern video cameras, the review of anomaly detection systems in video sequences is identical to the review of methods for detecting anomalies in video sequences of surveillance cameras. All of the above schemes are functionally the same, but with the continuous development of optics, electronics and computing technology, the hardware composition of anomaly detection systems in video sequences of video surveillance cameras is changing somewhat.

For a better understanding, we can say that now the computing and communication (network) capabilities of IP video cameras are better than those of powerful computers of the 2000s. Those blocks in such systems that required separate housings and many cables for the operation of video surveillance systems have turned into small microprocessor boards that are easily mounted in IP video camera housings. But new methods for processing video capture results (and these are mostly methods associated with the use of neural networks) require significantly greater computing power. This is where the network capabilities of IP video cameras and cloud services come in handy, with the help of which huge amounts of recorded data are stored and processed using new network technologies.

Above, we talked about the fact that with the development of microprocessor technology and cloud technologies for storing and processing information, it is difficult to separate systems for detecting anomalies in video sequences from video surveillance systems. We believe that with the further development of radio electronics, information technologies, computing power of modern microprocessors and mathematical modeling, each video surveillance system will simultaneously be a system for detecting anomalies in video sequences.

As can be seen from Fig. 2, modern intelligent video cameras such as the Hikvision video camera themselves are a system for detecting anomalies in video sequences, and the differences between one system for detecting anomalies in video sequences from another are the differences between the methods for detecting such anomalies.

It can be summarized that intelligent video cameras themselves become anomaly detection systems in video sequences due to the following factors:

- the presence of a module in the video camera for primary processing of video surveillance results;

- the presence of a module in the video camera for Internet communication, i.e. the ability to use cloud technologies and services for storing and processing information.

There are two types of tasks related to the search for anomalies [179] in video sequences.

1) Detection of outliers, which are defined as observations that are significantly different from others. Algorithms for determining such outliers try to find in which section of the video sequence the bulk of the data is located. Anomaly observations interfere with the use of this data and are removed before machine learning. The procedure for detecting such anomalies is called Outlier detection.

2) Detection of anomalous behavior in a situation where there are observations that describe normal states of the system, and when new data appears, it is necessary to determine whether they are anomalous. This approach is called Novelty detection. It is most suitable for analyzing a video sequence and determining whether there are anomalies in a new frame compared to the previous ones.

One of the simplest approaches used in video surveillance is video detection. A video detector compares the next frame pixel by pixel with the previous one or with a group of frames and signals a change in static images. At the same time, it is determined in advance whether to take into account more or less changes in color depth, or to exclude reactions to certain zones in the frame, and the area of changes is determined. The most significant disadvantage of video detection is low noise immunity. If, for example, there are branches swaying in the wind in the video detection zone, then the accuracy is significantly reduced. And this requires continuous manual control in real time or long-term viewing of video archives to track important events. Such noise in a fixed video sequence is a big problem in the video surveillance process.

That is, to the problem of the huge amount of video information that is constantly accumulating in the process of video surveillance, there is added the problem of

analyzing this video information. In addition, this analysis needs to be carried out mostly in real time, that is, during observations.

We have come to the point where it is necessary to introduce a new concept for this study. This is video analytics or video content analysis (Video content analysis or video content analytics (VCA)) - the ability to automatically analyze a video sequence to detect and determine temporal and spatial events [181].

Video analytics does not compare static images and pixels as such, but changes in the nature of activity. It works with dynamics, finds a new movement against the background of other movements. When an object enters the frame or starts to move, its nature of activity is analyzed and remembered, which becomes a sign of the identity of this object. The reaction occurs when this pattern of movement changes or when a different nature of movement appears in the frame, and even their combinations when superimposed. One of the most urgent tasks in video surveillance systems is to reduce the amount of useless information, remove unnecessary data, unlike other approaches to video analytics, when information necessary for a person is recognized.

This goal is served by the so-called video semantics - "a brief logical presentation of video information by decomposing it into semantic units (video plots), each of which has its own complete content, which differs from both the previous and the next video segment" [182]. Video semantics does not work every time the twig shakes in the last example, but only once, when the weather changes and becomes windy. Subsequent vibrations will not be registered as unimportant information. At the same time, the "short data" technology shortens everything, including the obstacles themselves. The results panel will report a twig shaking, but once during windy weather, which is thousands of times less than several hours of continuous video recording tied to standard video detection.

One of the first video surveillance systems that worked on the "short data" technology was an automated surveillance technology called Annotation of Critical Evidence (ACE) Surveillance [182]. It is engaged in the extraction and processing of annotated critical sections of video surveillance. ACE technology consists of the ACE Capture module and the ACE Browser module. ACE Capture works as follows: the

video signal from the camera is constantly processed on a computer. When a new object or activity is detected, the software triggers an alarm. Critical snapshots of the data are automatically captured and stored. Each such snapshot is provided with text annotations (explanatory captions) that help to understand the data and increase the manageability of archived data.

Annotations to the snapshots include: the location and size of the moving object, the direction from which the object appeared and its speed. The ACE browser is responsible for the preparation, efficient viewing and search of archived data. This system structure is intended to simplify the detection of anomalous events in the huge amount of stored video surveillance data.

Another author [183] gives a different definition of this new scientific and technical direction. Video analytics is a hardware-software or technology that uses computer vision methods for automated data collection based on the analysis of streaming video (video analysis), which relies on image processing and pattern recognition algorithms that allow video analysis without direct human participation.

In principle, these two definitions do not contradict each other. Both state the automatic nature of processing and analyzing video information using computer technology. Recently, the use of video analytics in video surveillance systems has been given great attention.

Let's try to understand how video analytics relates to the search for anomalies in the video sequence of surveillance cameras. In [183], the basic functions of analytics are given, on which all other functions of its work are built.

1) Object detection. Detection of objects in the field of view of the video camera is carried out using video motion detectors, and analysis of several objects is also possible. If movement is not a sufficient sign for localization of an object in the frame, then sometimes templates are used, including Haar features, which are known to us from the problems of computer vision.

2) Object tracking. Tracking algorithms allow you to get the trajectory of an object's movement both in the field of view of one camera and according to the results

of tracking by several cameras. For example, this is how cars moving at high speed are identified.

3) Object classification. Video analytics systems classify objects. For example, a typical object classifier, using shape features and absolute dimensions, divides objects into groups: a person, groups of people, and a vehicle.

4) Object identification. Object identification is the most complex component of video analytics systems. Modern video surveillance systems equipped with a video analytics unit allow you to identify people by biometric features of a person, or vehicles by license plates.

5) Detection or recognition of situations. By following certain algorithms and using the same operations as in points 1-4, video analytics software allows not only to highlight objects from streaming video, but also to recognize alarming situations based on the analysis of the behavior of these objects. Such situational video analytics can automatically detect, for example, crossing a signal line, falling people, prohibited parking, fires, etc.

The above basic video analytics functions for video surveillance systems require various methods for their implementation. In recent years, quite a few such methods have appeared. In the next section, we will try to classify them and analyze the features of their application.

The last point of the above basic video analytics functions almost completely corresponds to the tasks facing systems for detecting anomalies in the video sequence of surveillance cameras. Although it all depends on the purpose of creating or purchasing each specific video surveillance system. Its tasks are discussed with the client or customer of such a system. It is necessary to choose such a method of detecting anomalies in the video sequence of video surveillance cameras or a set of methods so that he or they are able to solve the security tasks set.

Now, having information about the use of software or hardware video analytics blocks in anomaly detection systems in video sequences of video surveillance cameras, we present a modern functional block diagram of an intelligent anomaly detection system in video sequences (Fig. 4) [180].

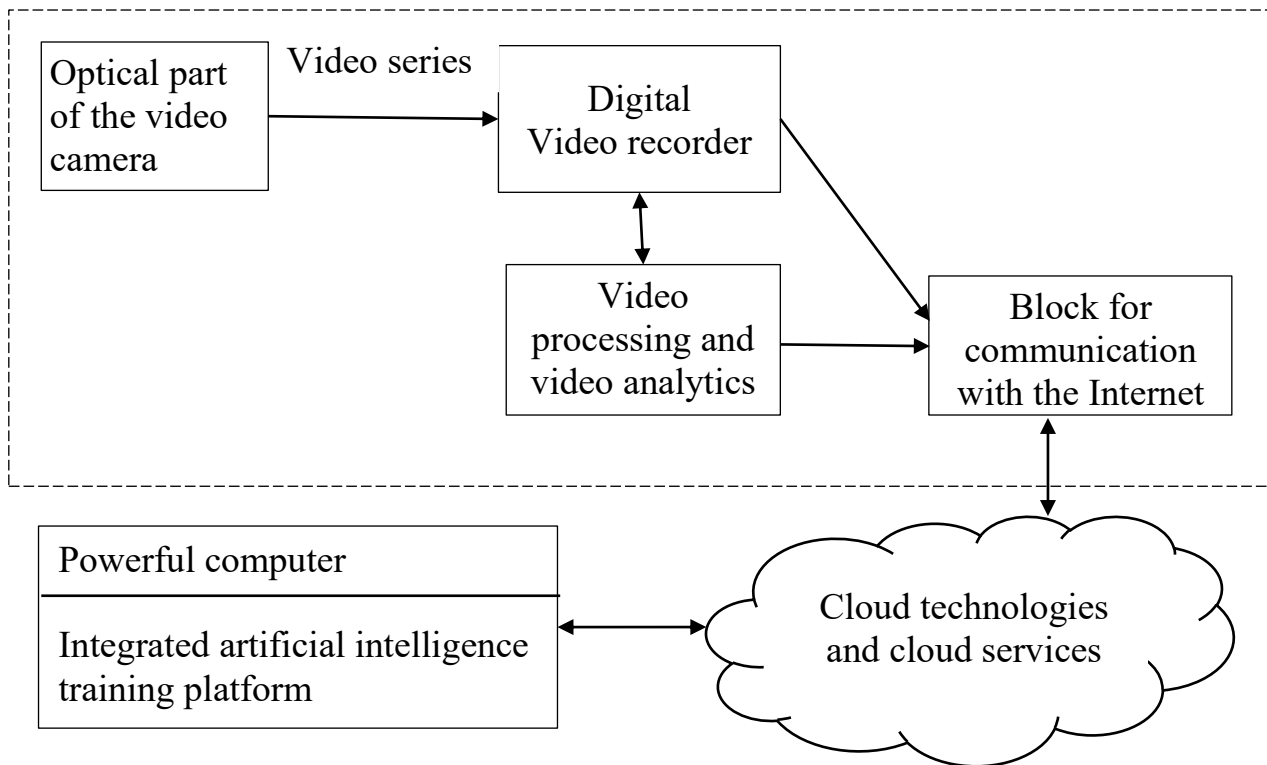


Figure 4. Proposed functional block diagram of an intelligent video anomaly detection system

The functional block diagram of the intelligent system for detecting anomalies in the video sequence of video surveillance cameras, which we have proposed, is shown in Fig. 4, and is universal in nature. It shows the composition of the anomaly detection system, which is based on a conventional video camera. In this case, the signal from the video camera, that is, the video sequence, is transmitted to the video recorder for storage and further operations. After video recording, the signal from the video camera is transmitted to the processing unit or, if necessary, to the Internet for deeper processing using the most modern technologies (neural computing networks and others), for further analysis or storage. Intelligence in this version is provided by modern algorithms and powerful resources of the cloud environment. In the case of using a more expensive IP video camera, the blocks highlighted by dash-dotted lines are present in the camera itself. Depending on the tasks of the system and the

availability of certain equipment, in each specific case there may be a different composition of the anomaly detection system in the video sequence.

Modern intelligent video surveillance cameras can also have built-in video analytics functions. The advantage here is that such analytics capabilities in video cameras do not depend on network bandwidth and server response time. Such a solution is beneficial where high efficiency and immediate response are required. Video data in this case is stored on the video cameras themselves and can be retrieved for analysis at any time via a remote client program. In the case where an intelligent IP video camera is used for surveillance, it combines several blocks from Scheme 4 (dotted line). Primary processing can be performed by the camera itself (video processing and video analytics unit). If more powerful computing resources are required, for example, in the case of using neural technologies, cloud resources are used.

In any case, the anomaly detection system in the video sequence of video surveillance cameras shown in Fig. 4 belongs to the Intelligent Video System (IVS) systems. There are different types of intelligent video equipment in the field of IVS: from simple devices that record any movement at all, built into the lower tier of digital video cameras, to expensive advanced systems that classify objects and their behavior, compensating for false alarms and illusory actions. Some video surveillance and anomaly detection systems in the video sequence are intelligent due to the use of an intelligent video camera, and some - due to their deep learning in neural networks.

A universal functional block diagram of the anomaly detection system in the video sequence of video surveillance cameras, which belongs to intelligent video analytics systems, has been developed. Such a system is based on simple digital video cameras of the lower tier to expensive advanced systems that classify objects and their behavior, compensating for false alarms and illusory actions. A video surveillance system and anomaly detection in video footage can be intelligent through the use of expensive intelligent video cameras, or perhaps through its deep learning in neural networks and the use of cloud computing resources.

In general, there are many methods for detecting anomalies in video footage from video surveillance cameras, and their successful use requires appropriate analysis. Such an analysis will be conducted by us in the next section.

In modern systems for detecting anomalies in the video sequence of surveillance cameras, the presence of video analytics is almost mandatory. The existence and development of video analytics are inextricably linked to artificial intelligence.

The concept of artificial intelligence includes Machine Learning (ML) algorithms [182]. Such algorithms automatically create a mathematical model of a process or object, using huge amounts of sample data to obtain the ability to calculate results without a specially created program. Machine learning algorithms are developed using an iterative process, in which the cycle of collecting training data, labeling it, using labeled data to train the algorithm, and testing the trained algorithm is repeated until the desired level of model quality is achieved. After that, the algorithm is ready for use in an application for processing and analyzing data, which can be implemented on the surveillance object. Training is complete, since the application will not learn anything new. A typical task of AI-based video analytics is to detect and classify objects (people and vehicles) in a video stream. A machine learning algorithm learns a combination of visual characteristics that allows it to identify these objects.

A deep learning algorithm is more sophisticated and can detect much more complex objects. However, it also requires more effort to develop and train, and much more computing resources when used in a fully developed application. The development of algorithms and the expansion of the capabilities of data processing cameras have made it possible to use advanced AI-based video analytics directly in the camera, instead of performing all the calculations on the server. This means that the received data can be analyzed in real time, because applications can immediately use the compressed video material. Thanks to dedicated hardware accelerators, such as the Machine Learning Processing Unit (MLPU) and Deep Learning Processing Unit (DLPU), an embedded camera with video analytics requires less power than using a central or graphics processor.

Before installing an application for intelligent video analytics, you must carefully study and strictly follow the manufacturer's recommendations, based on known prerequisites and limitations. All video surveillance systems are unique, and the effectiveness of the application must be evaluated on a case-by-case basis. If the quality is lower than expected, you need to look for the cause in the complex, and not focus only on the analytical application. The performance of video analytics depends on many factors related to the equipment and configuration of the camera, the quality and dynamic characteristics of the video image, as well as the illumination in the frame. In most cases, knowledge of the impact of these factors and their appropriate optimization can improve the effectiveness of video analytics. As artificial intelligence is increasingly used in video surveillance, in addition to the benefits and new scenarios for its use, it is necessary to consider when and where this technology will be used. Artificial intelligence has been developed and discussed since the invention of the first computers. Although full-fledged artificial intelligence is still a long way off, technologies with its elements are already widely used to perform well-defined tasks in applications and systems such as voice recognition, search engines and virtual assistants. In addition, artificial intelligence is increasingly used in medicine, for example, in X-ray diagnostics and for analyzing the results of retinal scans.

AI-based video analytics is one of the hottest topics in the video surveillance industry, and it holds great promise. Applications have been developed that use AI algorithms to significantly speed up data analysis and automate repetitive tasks.

Machine learning is a subset of artificial intelligence that uses statistical learning algorithms to create systems that can automatically learn and improve without explicit programming.

The difference between traditional programming and machine learning is that computer vision, which allows computers to understand what is happening in a frame by analyzing photo or video data. Video analytics, like finding anomalies in video sequences, are related to computer vision, with some differences. Traditionally, programmed computer vision is based on methods for calculating image features, such as sharp edges and corners. These features must be manually specified by an algorithm

developer who knows what to look for in the visual data. The developer then combines these features to create an algorithm that can infer what is detected in the frame.

Machine learning algorithms automatically build a mathematical model using a large amount of training data to be able to make decisions by calculating the results without special programming. The features can be specified, but how to interpret them is learned by the algorithm itself as it processes large amounts of labeled or annotated training data. This technique of using features specified in combinations that the algorithm learns itself is called classical machine learning.

In other words, in the case of machine learning, you have to teach a computer to use the desired program. The data is collected and then annotated by humans, sometimes with the help of a server computer. The result is fed into the system, and this process continues until the program learns enough to detect the desired object, for example, a specific type of car. The trained model becomes the program. Note: once the program is ready, the system will not have learned anything new.

Deep machine learning is an advanced version of machine learning, where the system learns to extract features and how to combine these features in deep rule structures to produce an output [184]. Deep learning is also based on input data. The algorithm automatically determines which features to look for in the training data and learns the deep structures of related feature combinations. The algorithms used in deep learning are based on how neurons work and how the brain uses them to form higher-level knowledge by combining the output neural signals in a deep hierarchy. The brain is a system in which combinations are also formed by neurons, erasing the difference between extracting and combining features, making these processes in some sense the same. Scientists have modeled these structures in so-called artificial neural networks, which are the most popular (and one would think necessary) type of deep learning algorithm. Using deep learning algorithms, it is possible to create sophisticated visual detectors and automatically train them to detect very complex objects that are robust to scaling, rotation, and other variations.

The reason for this flexibility is that deep learning systems are trained on a much larger amount of data (and are also characterized by greater diversity) than classical

machine learning systems [184]. They often significantly outperform hand-crafted computer vision algorithms. This makes deep learning ideal for complex tasks where humans have difficulty formulating combinations of features (e.g., image classification, linguistic information processing, object or anomaly detection) (Fig. 5).

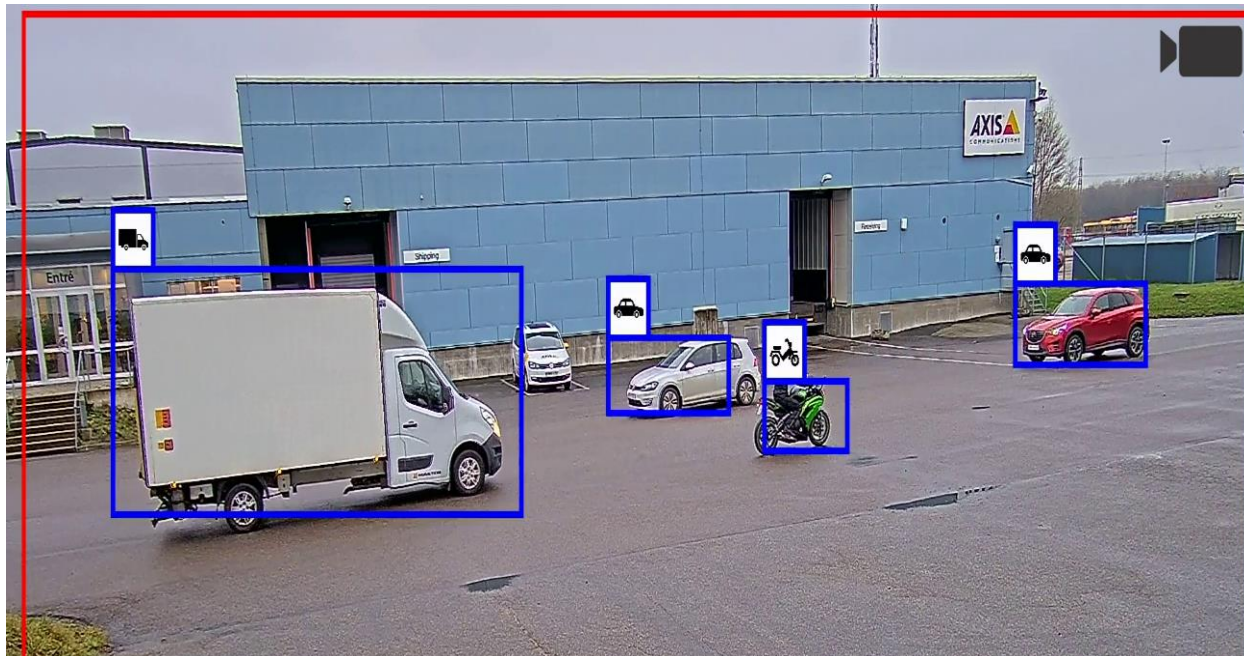


Figure 5. Object detection and classification by type based on deep learning [184]

After training, the model needs to be thoroughly tested. This phase usually includes an automated part and thorough testing in real-world deployment conditions. During the automated part, the program is tested using new data sets that were not used to train the model. If the results of such tests do not meet expectations, the process starts again: new training data is collected, instructions are created or refined, and the model is trained again. Once the desired level of quality is reached, field testing begins: the program is tested on real video sequences. The scope and variability depend on the scope of the program. The smaller it is, the fewer variations need to be tested. Conversely, the broader the scope, the more tests are needed.

The results are again compared and evaluated. This phase can again lead to the process starting all over again. Another possible outcome may be the identification of prior conditions that explain a scenario in which the program is not recommended for use or is recommended for use only partially.

The deployment phase is also called the inference or prediction phase. Inference or prediction is the process of executing a trained model [184]. The algorithm uses what it has learned during the training phase to produce the desired result. In the context of video analytics, the inference stage is the program used in a video surveillance system to monitor objects in real-world conditions. To achieve real-time performance when executing a machine learning algorithm on input audio or video data, special hardware acceleration is usually required. As noted above, the development of optimal algorithms and the increase in the computing power of peripheral devices in recent years have made it possible to use advanced video analytics based on artificial intelligence in the cameras themselves. Embedded video analytics has obvious advantages: analytical applications have almost instant access to compressed video material, which allows applications to be used in real time, avoiding the additional costs and complexities associated with moving data to the cloud for computing. Embedded analytics also requires less equipment and deployment costs, as the surveillance system requires fewer server resources. For some applications, it may be useful to combine two types of data processing: pre-processing on the camera and post-processing on the server. Such a hybrid system can contribute to the economical scaling of analytical applications by working with video streams from multiple cameras.

The information provided on machine learning will be useful for further analysis of methods for detecting anomalies in video sequences

At the beginning, we concluded that the differences between systems for searching for anomalies in video sequences from video surveillance cameras are due not only (and not so much) to the technical composition of such systems. For the most part, this is the influence of the methods that customers and designers, mathematicians, programmers and other specialists choose to process video information.

Currently, various methods for detecting anomalies in video sequences from video surveillance cameras are known. For greater clarity, we will present a classification of such methods in a graphical form (Fig. 6). They are usually divided into three classes: Supervised Anomaly Detection, Unsupervised Anomaly Detection, and Change Point Detection [174].

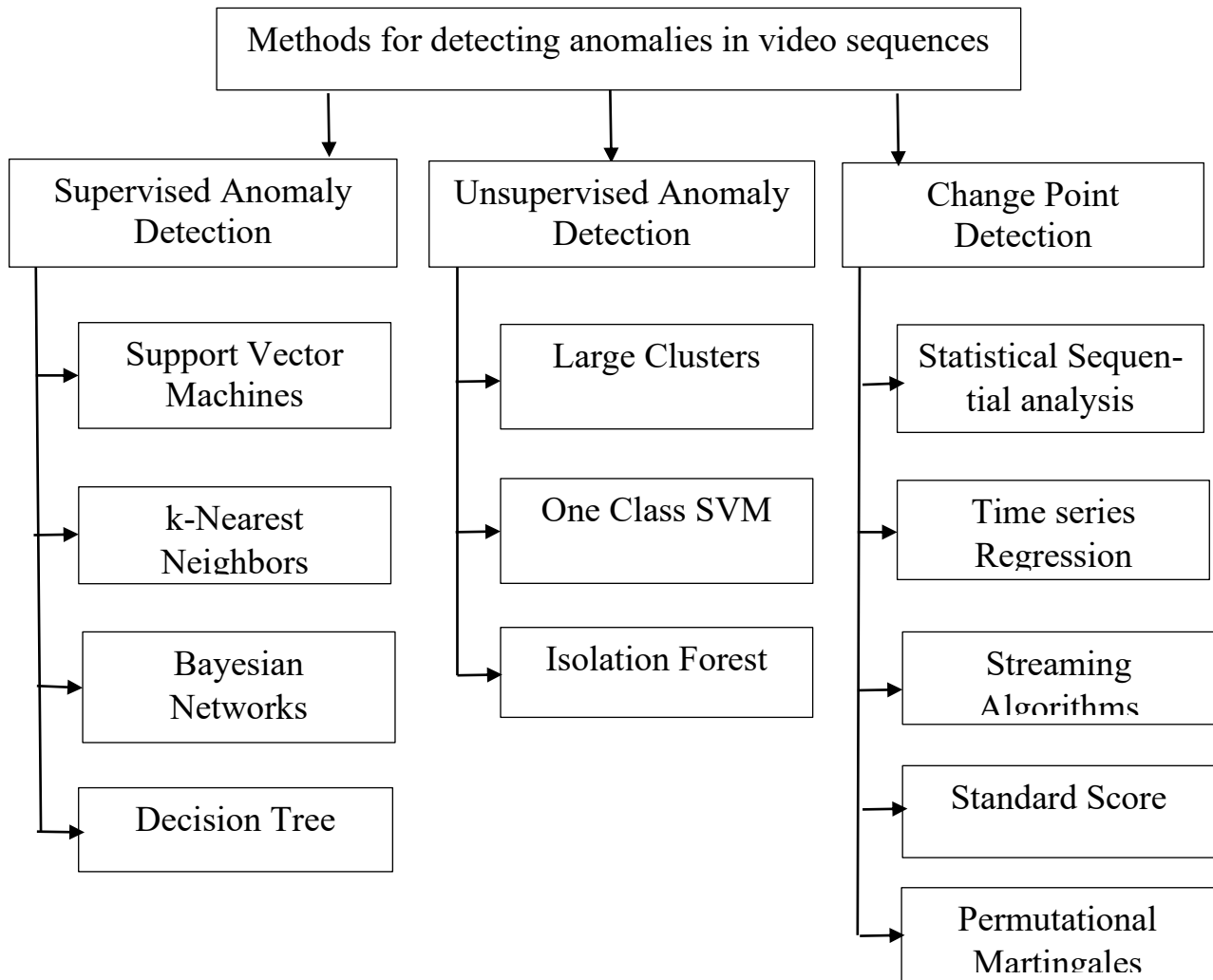


Figure 6. Classification of traditional methods for searching for anomalies in video footage from video surveillance cameras

Judging by the publications, anomaly detection methods are inextricably linked with machine learning. Moreover, methods of the Supervised Anomaly Detection class are related to supervised learning tasks, and methods of the Unsupervised Anomaly Detection class are related to unsupervised learning. Anomaly detection is one of the most common uses of machine learning.

In methods that use supervised anomaly detection, machine learning receives data with labels that determine whether there are anomalies or not. These are methods such as Support Vector Machines (SVM) [174, 185], k-Nearest Neighbors, Bayesian Networks, Decision Tree, and others [186]. However, a big problem for them is the

correct installation of labels. As a result, the input video data contains noise, which leads to frequent false positives.

The developers of the SVM method [185] state in the conclusions of their article that machine learning methods have attracted considerable attention among intrusion detection researchers to overcome the shortcomings of knowledge base detection methods. Anomaly detection includes supervised and unsupervised methods. Many algorithms have been used to achieve good results for these methods. This paper provides an overview of machine learning methods for anomaly detection. Experiments have shown that supervised learning methods significantly outperform unsupervised ones if the test data does not contain unknown attacks. Among the supervised methods, nonlinear methods such as SVM, multilayer perceptron (remember this) and rule-based methods show the best performance.

Unsupervised methods such as K-Means, SVM and One-class SVM have achieved better performance compared to other methods, although they differ in their ability to effectively detect all classes of attacks.

Next, we will analyze the k-nearest neighbors method, which is most often used for classification, although it can also be used for estimation and prediction. According to the authors of a large study [186], the k-nearest neighbors method is an example of instance-based learning, in which the training data set is stored, so that the classification for a new unclassified record can be found simply by comparing it with the most similar records in the training set.

Next, we will consider methods with unsupervised anomaly detection. For this class of methods, data is used for which it is not known which data are normal and which are anomalous. This situation is more typical of video surveillance analysis, and in this case, various approaches are used.

The simplest solution is clustering [187]. The authors proceed from the assumption that most of the data (large clusters) are the norm for many tasks, and only a small percentage of the data are anomalous. That is, data belonging to small clusters are the anomalies sought. In the conclusions, the authors state: "In this paper, we investigate the solution of the video anomaly detection problem by comparative

representation of the pretext learning problem. We introduce a new instance discrimination task, Cluster Attention Contrast, to obtain reliable normality subcategories as clusters. Experiments on control datasets demonstrate that our approach is effective and interpretable. The Cluster Attention Contrast task can help establish reliable and discriminative feature spaces for video anomaly detection. By exploiting the similarity between subcategory-specific representations and their corresponding centers, the proposed method achieves state-of-the-art performance on reference datasets. In this way, we have established a reliable normal concept without any prior assumptions about reconstruction or prediction errors. In the future, we would like to explore the following directions to improve this work. First, we will investigate the improvement of the performance of detecting small abnormal objects. In addition, we will develop a more reliable method to automatically determine the number of K feature gaps in encoders. Finally, we investigated different distance measures to obtain a more task-appropriate Cluster Attention Contrast method (Fig. 7)",

Other authors use the One Class Support Vector Machines or One Class SVM method. They model only normal data. This algorithm is one of the forms of the classical SVM algorithm [179, 188]. As the name suggests, to train it, it is enough to have only one class – “pure” observations without anomalies. The authors of the study [189] write about this method as follows: “One-class SVMs are used to separate data from one specific class, the target class, from other data. They are trained only on positive examples, that is, on data from the target class. In the feature space, the one-class SVM method separates all data points from the origin by a hyperplane and maximizes the distance of this hyperplane to the origin.” After several numerical experiments, the authors state that the corresponding one-class SVM classifier is accepted as the best model.



Figure 7. The bounding box in each subfigure indicates the location of the anomaly [188]

The third class of methods is based on the assumption that anomalies are not only few, but also have attribute values that differ significantly from the values of numerous normal instances. One example of this type is the Isolation Forest method (iForest - isolated forest) [190], which is based on the partitioning of the feature space of the detected video sequence in the form of so-called “isolating trees”. In this case, the anomalous points are significantly distant from the others.

The authors themselves [190] in the conclusions to the article say that this work proposes a fundamentally different model and method that focuses on anomaly isolation. The concept of isolation and its use have not been studied in modern literature. It is shown that the method is very effective in detecting anomalies. Taking advantage of the “few and different” nature of anomalies, iForest isolates anomalies closer to the root of the trees. This unique feature allows iForest to build partial models (as opposed to full models in profiling) and to use only a small portion of the training data to build efficient models. As a result, iForest has linear and low time complexity and low memory requirements, which is very suitable for the case of large data sets.

The authors state that empirical evaluation shows that iForest performs significantly better than some other methods, especially on large data sets. In addition,

iForest converges quickly, which allows for high-efficiency anomaly detection. For high-dimensional problems that contain a large number of irrelevant attributes, iForest can achieve high levels of speed and performance. It is also demonstrated that iForest works well even when anomalies are absent from the training set. In essence, Forest isolation is an accurate and efficient anomaly detector, especially for large databases.

A whole family of promising and widespread methods solve the problem of anomaly detection, such as finding points of change of certain properties or characteristics of a video sequence as a time series due to the fact that video frames change over time. The name of this group of methods is appropriate - Change Point Detection (CPD). Several effective methods are based on this idea, allowing to determine the moments in time when significant changes occur in the time series [191]. And this, according to the definition, is a sign of anomalies in the video sequence. The authors of the study [191] say this about their work: “Change point detection is an important part of time series analysis, because the presence of a change point indicates a sharp and significant change in the data generation process. Although many algorithms have been proposed for change point detection, relatively little attention has been paid to evaluating their performance on real time series. Algorithms are usually evaluated on simulated data and a small number of commonly used series with unreliable ground truth.

Clearly, this does not provide sufficient insight into the comparative performance of these algorithms. Therefore, instead of developing yet another change point detection method, we believe it is much more important to properly evaluate existing algorithms on real data. To achieve this, we present a dataset specifically designed for evaluating change point detection algorithms, which consists of 37 time series from different application domains. Each series was annotated by five people to obtain real information about the presence and location of change points.

We analyze the consistency of human annotators and describe evaluation metrics that can be used to measure algorithm performance in the presence of multiple ground truth annotations. We then present a comparative study in which fourteen algorithms

are evaluated for each time series in the dataset. Our goal is for this dataset to serve as a testing ground for the development of new change point detection algorithms.”

The class of CPD methods, in turn, consists of two groups:

- 1) Online CPD methods, which are used in real-time video sequence studies, which are often found in modern video surveillance systems.
- 2) Offline CPD methods, which are used in anomaly detection in video sequences after the shooting process.

To detect moments of changes in the video sequence during video surveillance, the following methods are used (Fig. 1):

- 1) Statistical sequential analysis - a section of mathematical statistics that studies statistical methods based on a sequential sample formed during a numerical experiment, and at each step it is decided whether more data is needed for evaluation [192].

- 2) Time series regression [192] - the use of such a model allows you to predict trends, and then compare the predicted and actual indicators; a significant difference indicates a deviation or anomaly.

- 3) Streaming algorithms – are used to process a data sequence in one or a small number of passes and solve problems in which data is received sequentially and in large volumes [193].

- 4) Standard score (z-score) – the size of the range of values of measured values [192]. The larger the z-score, i.e. the range of values, the greater the probability that there is a deviation in the stream of values. To detect anomalies, it is necessary to specify the limits of z-scores that are considered normal. Z-scores that fall outside this range are considered anomalous. The method is capable of numerous false positives.

- 5) Permutational Martingales investigate whether each measurement in the sequence can be determined with equal probability (commutativity property). If there is a commutativity violation in this observed sequence, this indicates the presence of an anomaly [193].

In conclusion, we note that we have quite a lot of methods for searching for anomalies in the video series of surveillance cameras. Of course, neither the limited

scope of this work nor the lack of time for relevant research allows us to check all the above methods for searching for anomalies. We called these methods in Figure 6 traditional, because the vast majority of them have been known to the scientific community for a long time.

When you study the achievements of developers of certain methods or devices, it is difficult to expect an objective assessment of them from the developers themselves. You need to critically approach the analysis of such developments, especially in conditions of lack of time to personally verify the validity of the developers' positive conclusions. The criteria can be the conclusions and reviews of other scientists and researchers, as well as the repeated use of these developments in practice. When there is information about the successful use of such developments from third-party researchers, this significantly increases the likelihood that this really happened.

Time moves forward, and new developments, new technical achievements, devices and methods appear. To search for and detect anomalies in the video series of surveillance cameras, researchers and specialists in machine learning are also constantly trying to develop new methods and involve already known developments. Thus, in the twenties, neural networks began to be used for this purpose, although these algorithms were known much earlier. We will talk about this in more detail in the next section.

The article [189] presents an overview of the areas of application of supervised and unsupervised machine learning methods to solve the problem of anomaly detection. The authors used 60 literature sources and conducted complex numerical experiments on various models using a wide range (but not all) of anomaly detection methods known at that time (2013). Below is Table 1 with the results of these studies.

In the conclusions to the article [189], the authors note that neural networks perform well in numerical experiments on anomaly detection in time series. However, some classical machine learning methods have also received positive reviews.

In Table 1, we see that neural networks have serious advantages over other analyzed methods. The disadvantages of this method are also noted. The first of them, the need for training, does not seem to be a disadvantage now. After all, this is a study

from 2013. During this time, the use of machine learning has become almost a prerequisite for time series analysis.

Table 1.

Comparative analysis of anomaly detection methods [188]

Method name	Advantages	Disadvantages
1	2	3
K-Nearest Neighbor	1) Easy to understand when there are multiple predictor variables; 2) Useful for building models that include non-standard data types such as text;	1) Has large storage requirements; 2) is sensitive to the choice of similarity function used to compare instances; 3) lacks a principled way to choose k, other than cross-validation or similar; 4) requires powerful computing.
Decision Tree	1) Easy to understand and interpret; 2) Requires little data preparation; 3) Capable of handling both numeric and categorical data; 4) Uses a white-box model; 5) Ability to test the model with tests; 6) Robust; 7) Works well with big data	1) The problem of learning the optimal decision tree; 2) Decision tree scientists create overly complex trees that do not generalize well; 3) There are concepts that are difficult to learn because decision trees cannot express them
Support Vector Machine	1) Finds the optimal separating hyperplane; 2) Can handle very high dimensional data; 3) Some kernels have infinite Vapnik-Chervonensky dimension, which means they can learn very complex concepts; 4) Usually works very well	1) Requires both positive and negative examples; 2) A good kernel function must be chosen; 3) Requires a lot of memory and CPU time; 4) There are some numerical stability issues
Self-organizing map	1) Simple and straightforward algorithm that works; 2) Unsupervised topological clustering algorithm that works with nonlinear data sets; 3) Visualizes multidimensional data well in 1 or 2-dimensional space. This makes it unique, especially for dimensionality reduction	1) Time algorithm

Continuation of table 1

1	2	3
K-means	1) Low complexity	1) Need to specify k; 2) Sensitive to noise and outliers; 3) Custers are sensitive to the initial assignment of centroids
Expectation - Maximization Meta	1) Can easily modify the model to adapt to different distribution of data sets; 2) The number of parameters does not increase with increasing training data	1) Slow convergence in some cases
Neural Network	1) Can perform tasks that a linear program cannot; 2) When an element of a neural network fails, it can continue to work without any problems; 3) A neural network learns and does not need to be reprogrammed; 4) Can be implemented in any program	1) Neural networks require training to work; 2) Neural network architecture is different from microprocessor architecture, so it needs to be tuned; 3) Requires a lot of processing time for large neural networks

Another disadvantage, such as the need for a lot of processing time for large neural networks, has also almost disappeared over the years due to the continuous development of computing and microprocessor technology, the increase in speed and memory in modern computers. Given this, we can conclude that it is possible and advisable to use neural networks to detect anomalies in video footage from surveillance cameras, which is confirmed by many modern researchers.

Despite the presence of many methods for searching for anomalies in video sequences, which are in the arsenal of researchers, recently the main tool in this field is neural networks. This situation is not only in the direction of searching for anomalies. Analysis of big data in general, which ten years ago was carried out using traditional or classical machine learning algorithms, now uses mainly methods based on neural networks. Our research of literary sources indicates that modern video surveillance systems in large campaigns and in government institutions most often use the so-called "smart" intelligent technologies based on models and methods of neural networks that

detect objects in video sequences. Such technologies also allow finding various properties of objects both in each frame separately and in the dynamics of the video stream. Neuronal networks (NN) are mathematical models of the organization of real biological neural networks [194]. But unlike mathematical models of biological neural networks, artificial neural networks do not require an accurate description of all chemical and physical processes, such as the description of the “firing” of an action potential, the work of neurotransmitters, ion channels, secondary mediators, transport proteins, etc. Artificial neural networks are required to resemble the work of real biological neural networks only at the functional level, not at the physical level.

The basic element of a biological neural network is a neuron, shown in Fig. 8.

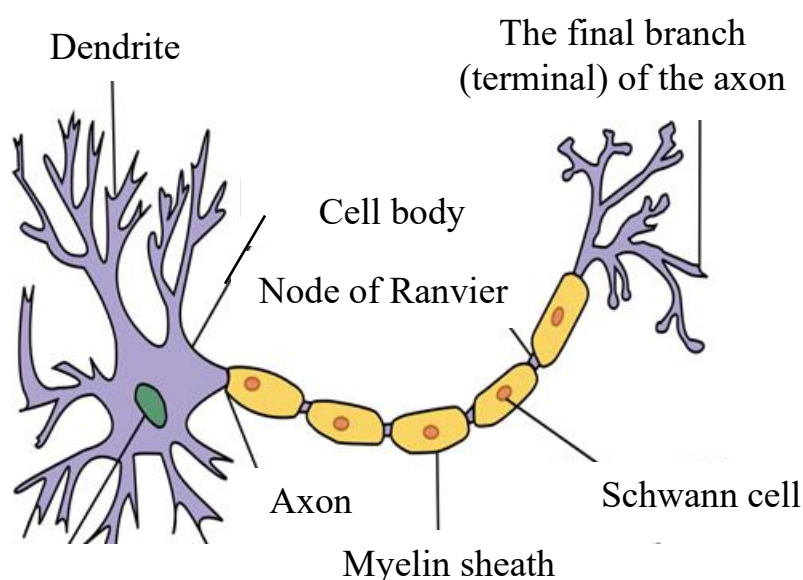


Figure 8. Typical structure of a biological neuron [189]

To understand the operation of an artificial neuron, we will describe the functioning of a biological neuron in general. The structure of a biological neuron can be simplified to the following [194]: dendrites, neuron body and axon. Dendrites are branching processes that collect information from the input to the neuron (this can be external information from receptors, for example, from a cone in the case of color, or internal information from another neuron). If the input information has activated the neuron (in the biological case, the potential has become higher than a certain threshold value), an excitation wave is generated that propagates along the membrane of the

neuron body, and then through the axon, by releasing a neurotransmitter, transmits a signal to other nerve cells and tissues. In nervous tissue, the axon connects to the body of the next nerve cell, to dendrites or to another axon. Based on this, Warren McCulloch and Walter Pitts in 1943 proposed a model of a mathematical neuron. And in 1958, Frank Rosenblatt, based on the McCulloch-Pitts neuron, created a computer program, and then a physical device - a perceptron. This is where the history of artificial neural networks began. Now let's consider the structural model of a neuron, which we will deal with further (Fig. 9).

This diagram contains the following components:

- 1) the input column vector of parameters X . The components of the vector x_i are numbers that, for a real neuron, determine the degree of activation of various receptors and which came to the input of the neuron;
- 2) the column vector of weights W , the numerical values of which w_i change during the learning process. Biological learning also exists. In the presence of synaptic plasticity, the neuron learns to respond correctly to signals from its receptors);
- 3) the adder is a functional block of a neuron that adds up all the input parameters multiplied by their corresponding weights;
- 4) the neuron activation function $f(S)$ is the dependence of the neuron output value on the value coming from the adder;
- 5) subsequent neurons, where one of their many own inputs is fed with the value from the output of this neuron (this layer may be absent if this neuron is the last in the computational network).

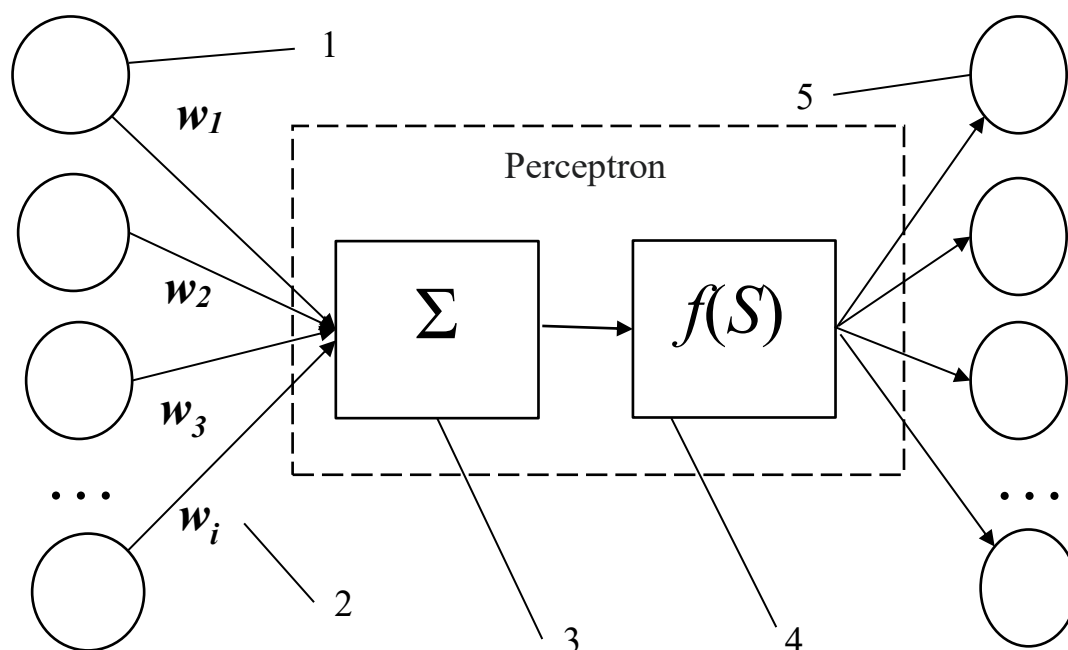


Figure 9. Scheme of an artificial neuron (perceptron): 1 - neurons, the output signals of which are fed to the input of this neuron; 2 - weights of input signals; 3 - adder of input signals; 4 - transfer function calculator; 5 - neurons, the inputs of which are fed with the signal of this neuron [193]

Then, from these minimal structural units, classical artificial neural networks are assembled [194]. The following terminology is adopted:

1) input (receptor) layer - this layer consists of neurons that do not perform computational operations, but simply transmit the received input signal to the output, possibly amplifying or weakening it. The task of the layer is to provide digital information received by receptors from the "external" world. The input layer contains as many elements as there are input parameters (plus a bias-term, necessary to shift the activation threshold) (Fig. 10);

2) associative (hidden) layer - a deep structure capable of memorizing examples, finding complex correlations and nonlinear dependencies, and constructing abstractions and generalizations. It consists of neurons that perform basic computational operations. In the general case, these are several layers between the input and output. We can say that each layer prepares a new (higher-level) feature vector for the next layer. It is this layer that is responsible for the emergence of high-

level abstractions in the learning process. The structure contains as many neurons and layers as you like, or may not exist at all;

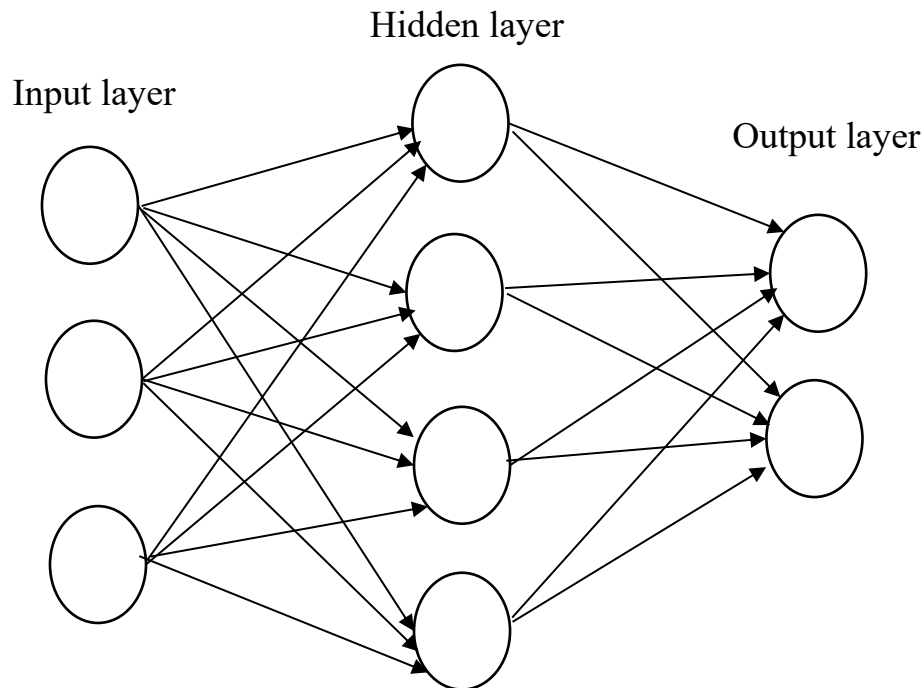


Figure 10. Classical topology of a neural network with input (receptor), output, decision, and associative (hidden) layers [194]

3) the output layer is a layer, each neuron of which is responsible for a specific class. The output of this layer can be interpreted as a probability distribution function of the object belonging to different classes. The layer contains as many neurons as there are classes represented in the training sample. If there are two classes, then you can use two output neurons or limit yourself to just one. In this case, one neuron, as before, is responsible for only one class, but if it gives values close to zero, then the sample element according to its logic must belong to another class.

Due to the presence of hidden associative layers, an artificial neural network is able to build hypotheses based on finding complex dependencies. For example, for convolutional neural networks that recognize images, the input layer will be fed with the brightness values of the image pixels, and the output layer will contain neurons responsible for specific classes (person, car, tree, house, etc.). In the hidden layers,

neurons that are excited by straight lines of different angles will begin to appear (specialize) "by themselves", then react to corners, squares, circles, primitive patterns: alternating stripes, geometric mesh ornaments. Closer to the output layers are neurons that react, for example, to an eye, wheel, nose, wing, leaf, face, etc. (Fig. 11).

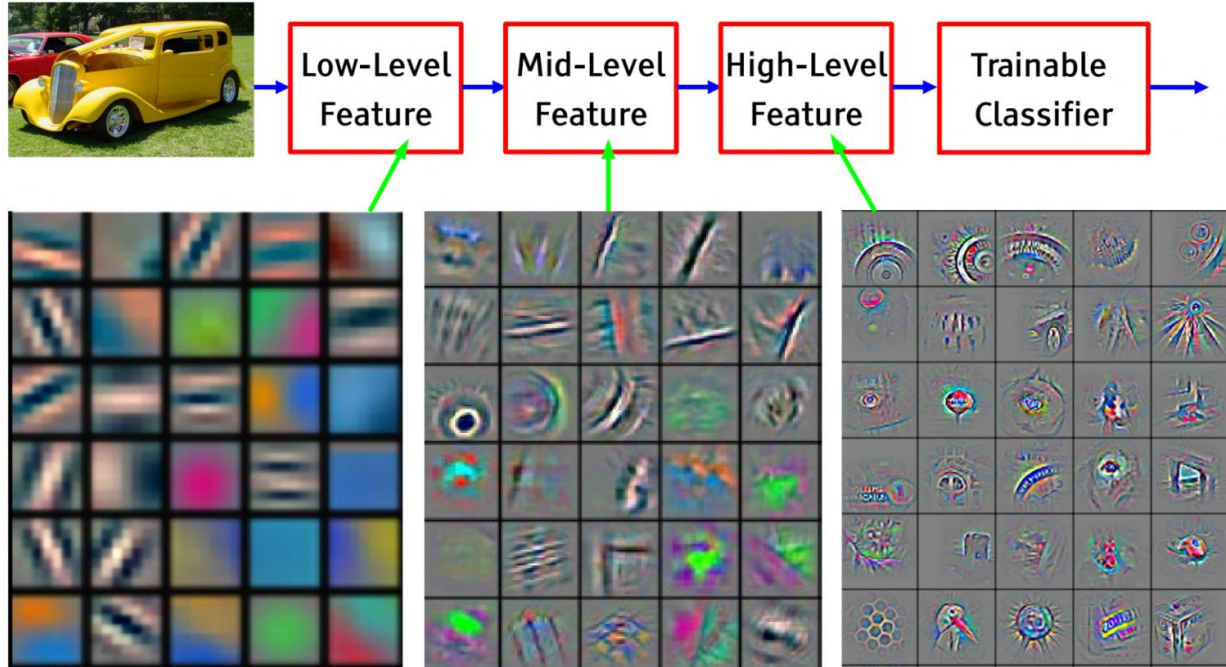


Figure 11. Formation of hierarchical associations in the process
of training a neural network [194]

In the simplest case, the entire neural network can be represented by a single neuron. In this case, even a single neuron sometimes copes well with the task, especially when it comes to recognizing an object class in a space in which objects of these classes are linearly separable.

For a mathematical description of the above about artificial neurons, we first write. At the input of the neuron we have a vector of parameters, represented in numerical form [194]:

$$X_i = \{x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n}\}$$

where n – is the number of parameters;

i – is the number of classes, if the classification task is considered.

In this case, each class is assigned Y_i – a class that characterizes the success of the form 1 or 0. The neural network must find the optimal separating hypersurface in a vector space, the dimension of which corresponds to the number of features. Training a neural network in this case – is finding such values (coefficients) of the weight matrix W for which the neuron responsible for the class will give values close to unity if the corresponding class is defined and values close to zero if the corresponding class is not defined.

The result of the neural network is usually called a hypothesis. The hypothesis is denoted as $h(X)$, showing the dependence of the hypothesis on the input features (parameters) of the object. The value of the hypothesis is calculated by the following formula [195]:

$$h_w(X) = f\left(\sum_{k=1}^{|w|} w_k \cdot x_k\right) \equiv \sigma(w \cdot x)$$

where $h_w(X)$ – the value of the hypothesis for the vector of input parameters X ;

- the weight of each parameter;
- the k -th input parameter of the vector X .

As can be seen from the formula, the result of the neuron's operation is the activation function (often denoted by σ) of the sum of the product of the input parameters by the coefficients sought in the training process. Let's figure out what an activation function is.

Any real values can be input to the neural network, and the coefficients of the weight matrix can also be any real numbers [194]. Therefore, the result of adding such numbers can be any real number from minus to plus infinity. Each element of the training sample has a class value for this neuron from zero to one. It is necessary to obtain from the neuron an output value in the same range from zero to one and make a decision about the class depending on what this value is closer to. It is better to interpret this value as the possibility that the element belongs to this class. That is, such a monotonic smooth function is needed that will map elements from the set of real numbers into the range from zero to one.

In real biological neurons, such a continuous activation function has not been implemented by nature. In human cells, there is a resting potential, which is on average -70 mV [194]. If information is supplied to a neuron, the activated receptor opens the ion channels associated with it, which leads to an increase or decrease in the potential in the cell. An analogy can be drawn between the strength of the reaction to receptor activation and one coefficient of the weight matrix obtained during the learning process. As soon as the potential reaches the value of -50 mV, an action potential arises, and a wave of excitation reaches the presynaptic ending along the axon, releasing the neurotransmitter into the intersynaptic medium. That is, real biological activation is stepwise, not smooth: the neuron is either activated or not. This shows how mathematically free we are in building our models. Taking the basic principle of distributed computing and learning from nature, we are able to build a computational graph consisting of elements that have any desired properties. In the example, we want to receive continuous, i.e. continuous, analog, rather than discrete values from a neuron. Although in the general case the activation function can be different.

The conclusion from the above is as follows: “Neural network training (synaptic learning) should be reduced to the optimal selection of weight matrix coefficients in order to minimize the error allowed” [194]. In the case of a single-layer neural network, these coefficients can be interpreted as the contribution of the element parameters to the possibility of belonging to a particular class.

It is necessary that the hypotheses of the neural network correspond as much as possible to reality (to real classes of objects). Actually, this is where the main idea of learning from experience is born. Now we will need a measure that describes the quality of the neural network. This functional is usually called the “loss function”. The functional is usually denoted as $J(W)$, showing its dependence on the coefficients of the weight matrix. The smaller the functional, the less often our neural network makes mistakes and the better. It is to minimize this functional that training is reduced. Depending on the coefficients of the weight matrix, the neural network can have different accuracy. The learning process is a movement along the hypersurface of the loss functional, the goal of which is to minimize this functional (Fig. 12) [193].

Usually, the coefficients of the weight matrix are initialized randomly. During the training process, the coefficients change. The graph (Fig. 12) shows two different iterative learning paths for the coefficients w_1 and w_2 of the neural network weight matrix.

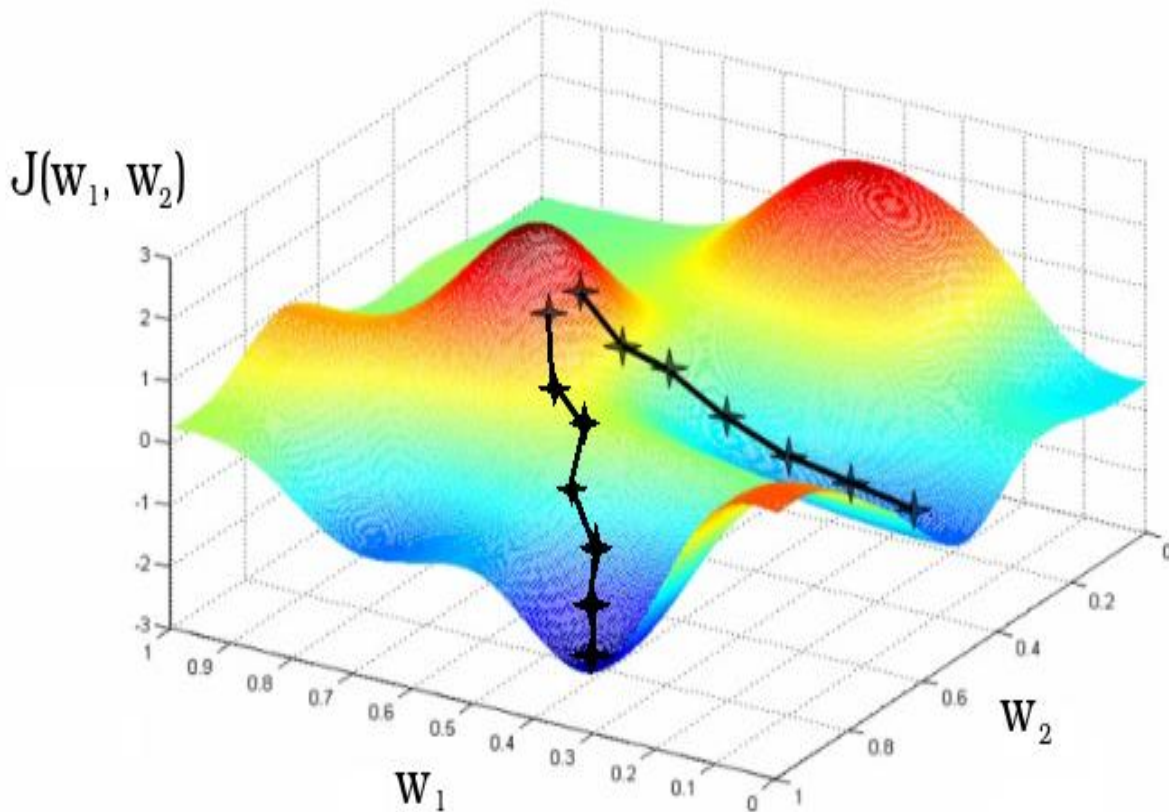


Figure 12. The learning process as gradient descent to a local minimum of the loss functional [194]

Conventional artificial neural networks require enormous computational power from the computers used. For example, in a dataset that is typically used to train computer vision models, images are 32x32 pixels in size and have 3 color channels. This means that one fully connected neuron in the first hidden layer of this neural network will have $32 \times 32 \times 3 = 3072$ weight units. This is already quite a lot, because there are other neurons and other layers. But the image can be larger, for example, $300 \times 300 \times 3 = 270000$ weight units, the training of which requires large computational power.

Such a huge neural network requires a lot of computational resources. Reducing this volume is the task of convolutional neural networks.

In the study [174], the authors state that the modern basic models that are successfully applied to the analysis of visual images are convolutional neural networks (CNN). These networks have two or more hidden layers. The first such successful network, AlexNet [194], which was created in 2012, contained 8 hidden layers. Since then, deep neural networks have been widely developed and distributed in various areas due to the fact that features in such networks are detected automatically, as well as due to their high efficiency in solving many tasks, including when working with images and videos [174]. The limited scope of our study does not allow us to dwell in detail on the history of the emergence and development of convolutional neural networks, which began in the middle of the twentieth century. In the study [195], scientists from Pakistan summarized data on convolutional neural networks known as of 2019. They processed 255 (!) literary sources. One of the results of their work is a detailed chronological and classification scheme for CNNs (Fig. 13).

The general conclusion that the researchers make and which best describes the development of convolutional neural networks for image processing is this: CNNs, when analyzing time series, allow using fewer parameters to obtain more accurate results.

There are many options for training a neural network. For example, the evolutionary (genetic) algorithm and the gradient descent method [194]. Evolutionary algorithms are a direction in artificial intelligence based on modeling natural selection. Previously, this approach was used to train deep layers of a neural network. Evolutionary algorithms have completely given way to gradient descent-based optimizers for the task of training deep neural networks, but they can still be used for educational purposes: evolutionary algorithms are very easy to understand. It is better to start with them for beginners, it is worth knowing them for further comparison of computational complexity and convergence with other (currently popular) methods. The gradient descent and backpropagation method is more complicated, but it is one of the most effective and popular training methods.

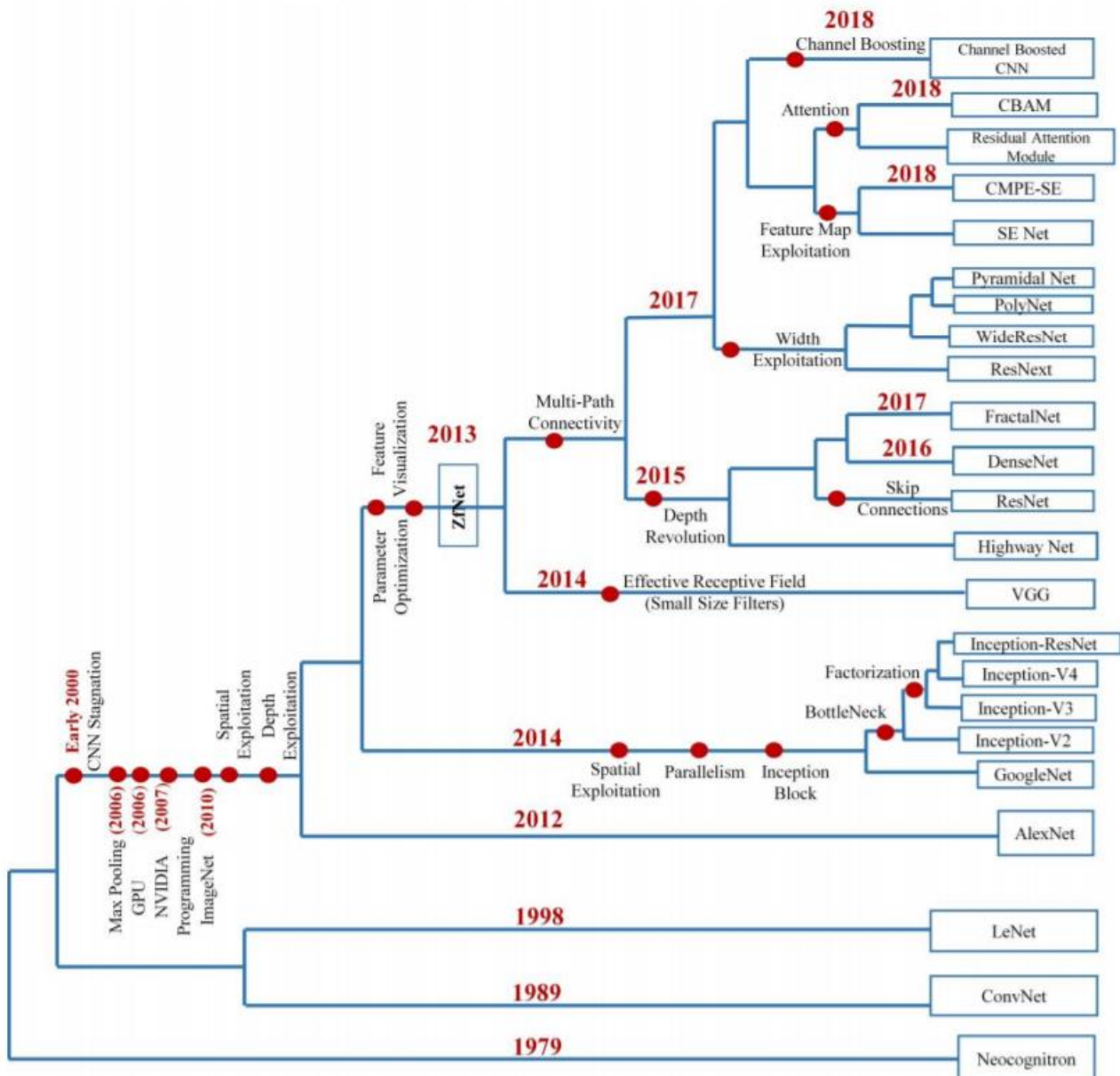


Figure 13. Historical development and hierarchical classification of convolutional neural networks [196]

Unfortunately, the scope of this monograph does not allow us to consider convolutional neural networks in more detail.

The input data set should be test and training video sequences that define various dynamic situations that affect the quality of the neural network as a component of the anomaly detection system. In particular, such situations include the speed of cars, the distance of the object from the camera lens, the lighting conditions of the scene, extraneous objects in the scene, etc. The standard frequency of 24 frames per second

was chosen as the shooting frequency. The total number of frames in the sequence is 124 frames, the image format is HD_720 (1280 pixels $\times$ 720 pixels), the color system is sRGB; the graphic image format is JPEG.

The training set consists of sequences of ordinary video frames. The model will be trained to restore these sequences. It is necessary to prepare the data for the model by performing the following three steps:

- 1) divide the training video frames into time sequences, each of size 10, using the sliding window technique;
- 2) change the size of each frame to 256 $\times$ 256 to ensure the same resolution of the input images;
- 3) scale the pixel values from 0 to 1, dividing each pixel by 256.

The development of experiments to verify the research conducted in this work and the statements and conclusions made on their basis should begin with the selection of components and components of the video surveillance system. First of all, it is necessary to decide how the video surveillance itself and the analysis of its results will be carried out - only with human participation, with automatic analysis of video recordings under human supervision, or fully automated from changing the video recording parameters (camera tilt, viewing angle, etc.) to intelligent analysis of recorded video information. In addition, it is necessary to decide when this video analysis will be done, simultaneously with video surveillance or after the latter.

The studies presented below have shown that from the point of view of searching for anomalies in the video sequence of surveillance cameras, the main factor is the financial capacity of the customer of the video surveillance system. Even the cheapest video camera can record video of some objects, events or processes, and then, using video analytics, analyze the recorded information using cloud services in terms of detecting anomalies in the video sequence. This option will cost quite a bit - from 3-4 thousand UAH (Fig. 14).

This is the AHD KIT 10800 PRO video surveillance kit, assembled on the basis of AHD format equipment (analog high resolution) [197].

The cylindrical universal AHD KIT 10800 PRO video camera with infrared illumination is made of street ABS plastic and has an IP-66 housing protection rating, which can withstand winter temperatures down to -300. The camera is assembled on the basis of a modern CMOS IR-CUT matrix and is capable of broadcasting video with a resolution of 2MP. A megapixel lens with a focal length of $f=3.6$ mm forms a high-quality focused image with high clarity and a wide viewing angle (900). The number and power of LEDs provide bright illumination for detailed night shooting with a viewing range of up to 20 meters. The wavelength of the infrared illumination is 850 nm and is invisible to the human eye. The illumination automatically turns on in low light.



Figure 14. Video surveillance system aHD KIT 10800 PRO [197]

The AHD KIT 10800 PRO DVR video recorder supports up to 4 video cameras and is capable of recording video in real time on all four channels. Through the implemented VGA and HDMI outputs, video can be displayed on a monitor or LCD TV. The recorder supports a choice of recording modes based on motion detection, constantly or on a schedule. Using the remote access function via connection via the

Xmeye Cloud cloud service, viewing video, as well as archived recordings, is available both via the global Internet on a computer and via a smartphone based on Android or iOS.

Such a video surveillance system fully corresponds to the functional diagram of the anomaly detection system in the video sequence, shown in Fig. 1. Only the video sequence processing unit will be after the unit for connecting to the Internet.

For a comparative analysis of several methods for searching for anomalies in the video sequence, test video clips may be sufficient. But in many literary sources studied by us, it was said that training models and their further use to search for anomalies in the video sequence is an individual matter. Therefore, it is better to conduct such research work in conditions close to real ones, that is, with video sequences obtained from specific video cameras.

Above, we discussed the simplest version of a modern video surveillance system, to the results of which it would be possible to apply methods for searching for anomalies. Next, it would be advisable to conduct a comparative analysis of different methods for searching for anomalies in the video sequence for video surveillance systems that differ in their capabilities, but also in price. The volume and material base of such experiments is entirely dependent on the appropriate funding.

If research funding allows, then, undoubtedly, it would be necessary to search for anomalies in the video sequence of cameras of such a surveillance system, which is designed to process the results of video surveillance online. Such an automated system is much more expensive, but it is also more in demand.

The automated system will receive broadcast video from video surveillance cameras and independently analyze the situation, which will relieve the operator of the load, thereby reducing the likelihood of error. That is, the proposed system consists of one or more video cameras that broadcast what is happening, as well as software that will process the broadcast to search for anomalies in the video sequence [174].

A valuable feature of video surveillance in such a system will be the ability to perform its functions with an autonomous power source. The video camera must be equipped with a battery and a recorder to continue recording even in the event of a

power outage. But this requires economical algorithms for processing the results of surveillance. The video camera must have good recording quality in the dark and be equipped with a motion sensor. Such a set of equipment will provide the most efficient and accurate analysis of information in any situation.

The video surveillance system must be developed as a client-server. The server, together with the main software system, is designed to process the broadcast to search for suspicious situations, focusing the operator's attention on what is happening.

The client software will allow those who have been authorized and can see the broadcast from the video cameras to receive notifications in case of suspicious events. In the event of a loss of connection between the video camera and the server, the client program should receive a message about possible suspicious activity.

As mentioned above, in order to choose a method for searching for anomalies in the video sequence of surveillance cameras, it is necessary to conduct a comparative analysis of several well-known modern methods. Now large software development companies offer their services and software products for using convolutional neural networks to work with images and video sequences.

We have made numerous attempts to use these software products, but the computing capabilities of the computer did not allow this.

Thus, a universal functional block diagram of the anomaly detection system in the video sequence of video surveillance cameras, which belongs to the intelligent video analytics systems, has been developed. The video surveillance and anomaly detection system in the video sequence can be intelligent due to the use of valuable intelligent video cameras, or perhaps due to its deep learning in neural networks and the use of cloud computing resources.

For the successful use of methods for detecting anomalies in the video sequence of video surveillance cameras, their appropriate analysis is required. Such a comparative analysis is carried out in this study. For this purpose, many modern methods for detecting anomalies in the video sequence have been considered and the foundations of the theory of deep neural networks and convolutional neural networks

have been considered from the point of view of the possibility of their application for detecting anomalies in the video sequence of video surveillance cameras.

Both traditional statistical methods and modern methods based on neural computing networks have been considered, including the history of their emergence and features of use. A historical and chronological classification of methods based on neural networks is given. A conclusion is made about the need to use convolutional neural networks to search for anomalies in video sequences.

A methodology has been developed for conducting numerical experiments on the comparative analysis of methods for detecting anomalies in video sequences from video surveillance cameras.

5.4 Software development road safety system

Every year, about a million people die on the world's roads due to car accidents and about 50 million more are injured. Such statistics are provided in [198] by the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Moreover, such a level of road injuries is very expensive for the economy of any country, absorbing from 1 to 3% of GDP.

In Ukraine, the situation with vehicle accidents is also difficult. In 2017, Prime Minister V. Groysman announced: "According to the World Bank, economic losses due to road accidents on Ukrainian roads amount to 1.5-2.5% of GDP. We lose \$4.5 billion from traffic accidents per year. Unfortunately, road safety issues in Ukraine have never been addressed systematically before" [199].

Road traffic injuries before the full-scale war were the main cause of mortality and disability and especially affected people of young and working age. Treatment of road traffic accident victims now places a great burden on the health and social protection services not only of Ukraine, but also of any country in the world, including the European Union.

But the most important thing is human lives and the grief of many families, which cannot be estimated in hryvnias or dollars.

The rapid increase in the number of vehicles and the increase in the intensity of road traffic leads to an increase in the number of road accidents and their negative consequences in our country as well. "Unfortunately, in Ukraine the level of mortality and injuries as a result of road accidents is one of the highest in the European region. Over the past six years, about 170,000 road accidents with victims have been registered, in which 26,500 people died and 209,000 were injured," noted A. Gavrilyuk, Deputy Director of the Medical Department, Head of the Department of Medical Care for Adults of the Ministry of Health of Ukraine [200].

For example, for the years before the full-scale war: "Since the beginning of this year, 54,500 road accidents have been registered. This is 12.1% more than last year.

Every eighth road accident involves victims: 723 people died, more than 8,000 were injured. The number of road accidents involving public transport drivers has doubled," said I. Prokhorenko [200], Deputy Head of the Department of Preventive Activities, Head of the Road Safety Department.

All of the above allows us to assess the importance and globality of the problem of reducing road transport accidents. The globality of the above-mentioned problem also determines the global level of efforts to solve it. This is being done by public organizations, national governments, and the largest international structures.

The OECD system includes the International Transport Forum, which is a global platform for policymakers in the transport sector.

Ukraine is a member of this body. In 2004, the OECD and the Transport Forum established the Center for Transport Research, whose specialists, together with specialists from the World Bank, the World Health Organization and the FIA (International Automobile Federation), in 2008, following three years of joint work, issued the report "The Pursuit of Zero: High Goals and a Systemic Approach to Traffic Safety"[198].

This 300-page work is the quintessence of the most interesting research, analysis, recommendations and forecasts for transport policy, which are worth studying separately, especially at a transport university. Since then, such global research has not been conducted, so we will rely on the data obtained. Let us dwell on one most important aspect of this research.

Having collected and studied data on road safety levels, current road safety strategies, costs associated with road accidents and costs of improving road safety, the experts concluded [198] that road safety can be improved in the short term by implementing a range of measures:

- 1) enforcing existing speed limits;
- 2) reducing drunk driving;
- 3) using seat belts;
- 4) making roads and roadsides safer;
- 5) making vehicles safer;

6) reducing risks for novice drivers.

The report examines these issues in great detail, which is beyond the scope of this work.

The Forum experts consider compliance with the speed limit on roads to be a key problem: "Speed is a central factor in road safety problems. It affects both the risk of getting into an accident and the consequences of an accident."

The correlation between accident rates and vehicle speed (Fig. 1) is studied in [198].

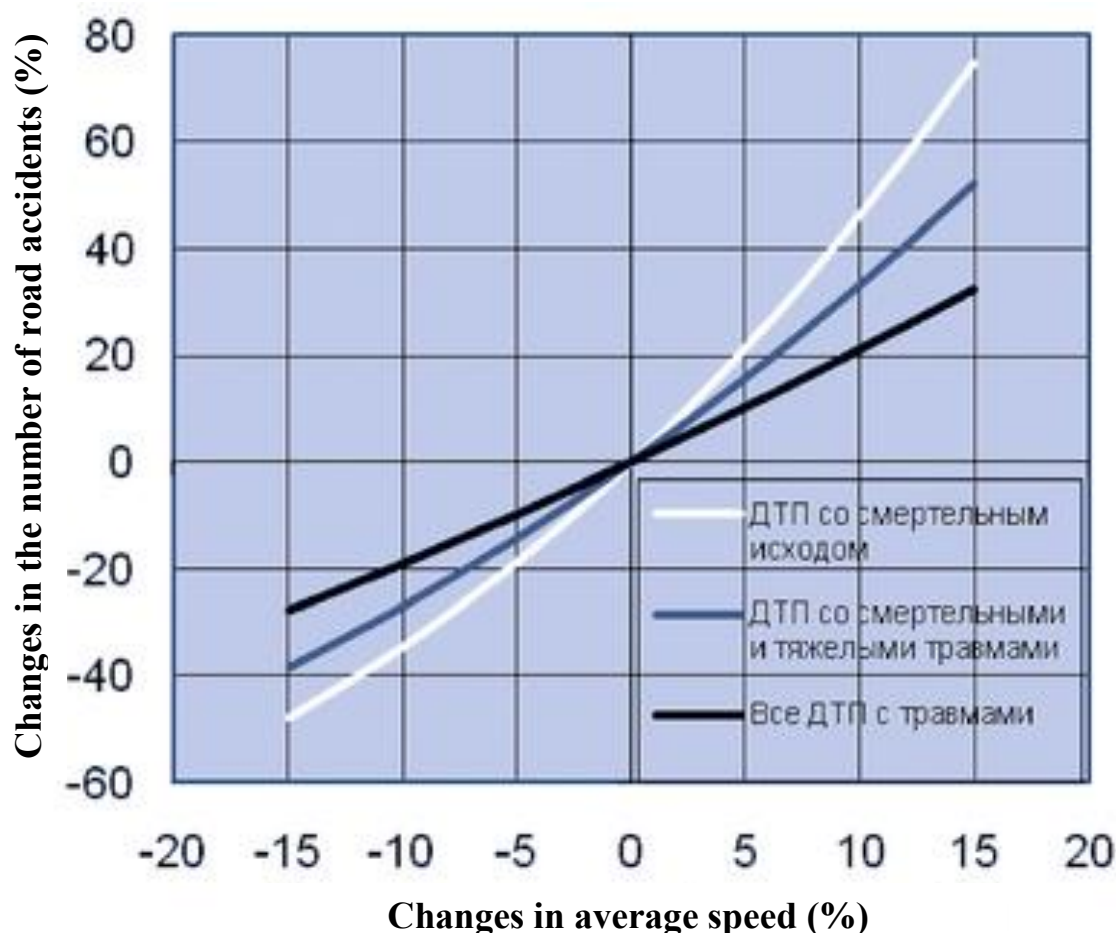


Figure 1. Correlation between accident rate and vehicle speed

According to this model, a 10% reduction in average speed leads to a reduction in the number of fatal accidents by almost 40%, which is confirmed by studies by many independent experts, references to whose works are given in [198].

According to the conclusions of the OECD report on speed management, an effective speed management program should, among other things, include improvements in vehicle design, including the use of information technology.

"Given the enormous positive potential of new technologies, their widespread implementation is strongly recommended," this is the conclusion of the experts, which is interesting for us [198]. In this area, they advise the following:

- 1) all new cars should be equipped with manually adjustable speed limiters and, where possible, with voluntarily installed Intelligent Speed Adaptation Systems (ISA);
- 2) to ensure the results of the application of ISA technologies, the state should create digital databases of speed limits with private partners that can generate electronic maps and distribute them to warn drivers about exceeding the permissible speed;
- 3) it is necessary to make the installation of ISA systems mandatory by law.

The ISA intelligent speed adaptation system should be installed in any vehicle (Vehicle) to ensure that the VHB complies with the established speed limit by reading the speed limits along the route.

Thus, experts from the International Transport Forum consider the main way to reduce accidents and fatalities on roads to be a reduction in vehicle speed, including mandatory ones.

Developing and implementing the recommendations of the Report [198], the European Transport Safety Commission (ETSC) plans to oblige automakers to equip all cars with a device that automatically and forcibly limits the speed (VV) in accordance with road signs from 2020 [201]. But we see that these plans were not implemented.

The above-mentioned device uses a video camera that recognizes speed limit signs, as well as navigation data, which prescribes the speed limit on different roads. The speed limit device (SLD) should learn about the location of the car using the global positioning system (GPS). The device will compare this data and will not allow the car to move faster than the permitted speed.

Presenting the European Commission's future plans to the European Parliament in Strasbourg, then-Transport Commissioner Violeta Bulc called Intelligent Speed Assistance (ISA) a revolutionary technology. She also said that when the proposed safety measures are implemented, "the EU will become a leader in road safety" [202].

It is obvious that the EU is implementing the recommendations of the International Transport Forum on reducing road accidents, including by introducing mandatory speed reductions in accordance with existing restrictions. However, the specific implementation of this plan by road and automotive industry experts has not yet begun (with some exceptions). In addition, as far as we know, there are no plans to digitize our country's roads in terms of speed limits, which is a necessary condition for the implementation of the ISA system.

The European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR), to which Ukraine has also joined, is a direct implementation of the recommendations of the Report [198]. In accordance with the strict technical requirements of these Rules [203], a vehicle transporting dangerous and explosive cargo is required to be equipped with a special system – a “Speed Limitation Device”. In the UNECE regulations No. 89, paragraph 2.6, subparagraph 1, it says: "The Speed Limitation Device means a mechanism that in one way or another reduces (limits) the amount of fuel supplied to the engine. This leads to limiting the speed of the vehicle to a given regulated value."

Vehicles carrying dangerous goods and subject to these requirements for the presence of a vehicle speed limitation device are trucks (rigid frame vehicles, as well as tractors for semi-trailers) with a maximum mass of more than three and a half tons.

According to paragraph 9.2.5 of the ADR, the SLD device must be adjusted so that the vehicle speed does not exceed 90 km/h, taking into account the regulatory tolerances for the device, within 5 km/h in the direction of increase or decrease.

One more point should be taken into account. Modern cars (cars and trucks) are most often equipped with a factory device built into the engine control system, which limits the maximum possible speed. But this is not what the rules for the transport of dangerous goods require. The fuel cut-off valve should be a separate, independent mechanical and electrical system that mechanically blocks the fuel supply to the required limit.

The principle of operation of the fuel cut-off valve is based [199] on the operation of a solenoid valve on the fuel supply line, which limits the further speed

gain of the vehicle. The MCU (microprocessor control unit) receives the corresponding signals from the speedometer or, depending on the vehicle, from the speed sensor on the gearbox. When the maximum set speed is reached, the MCU transmits a signal to the solenoid valve for controlling the fuel supply. When the signal is received, the valve closes, thereby limiting the fuel supply. The valve is set to exactly the amount of fuel supply that is necessary for a specific vehicle to achieve a given speed.

The use of a speed limiter on trucks carrying dangerous goods is also a direct implementation of the recommendations contained in the Report [198], but for a rather narrow category of cars. Of course, it is possible to equip all cars with such devices, including passenger cars. Without a doubt, this would significantly reduce the accident rate and mortality on the roads. So we can recommend that the state move in this direction.

But the speed limiter has a serious drawback: it is necessary for either the owner himself, or the driver of the car, or some authorized person to set the speed limit in the device. And this always leaves room for either error or deliberate violation. In addition, there is a difficulty in changing the permissible speed values, for example, when a car enters the city from a highway.

Manufacturers and dealers of conventional motor vehicles are unlikely to give permission to interfere with the car without voiding the warranty, which makes it practically impossible to use such technology in conventional cars.

Modern cars have been using continuous gasoline injection control systems or distributed systems for quite a long time, when fuel is supplied through a separate nozzle (injector) for each cylinder. With the development and miniaturization of microprocessor technology, it has become possible to control the process of fuel supply to the injectors using quite complex algorithms in accordance with the signals of numerous sensors (air flow, crankshaft position, exhaust gas temperature, and others). These algorithms take into account all possible requirements and limitations on the operation of the car engine in different modes and are implemented by engine control units or on-board computers. Fig. 2 shows a version of such a system developed by Bosch [205].

The system operates as follows: the air flow sensor measures the instantaneous air flow and uses its lever to control the plunger of the fuel metering device, which in turn directs to the injectors an amount of fuel that corresponds to the measured air flow. With a constant pressure in the upper part of the metering device, the pressure in its lower part is regulated by an electrohydraulic pressure regulator controlled by the controller.

The controller also receives signals from the coolant temperature sensor 11, the throttle potentiometer and switch, and from the ignition coil about the crankshaft rotation speed.

Based on these signals, the controller identifies the engine operation and changes the strength and direction of the current passing through the electromagnet winding of the electrohydraulic regulator, and by moving the spool, changes the cross-section of the through hole connecting the upper and lower chambers of the fuel metering device. If the spool fully opens the hole, the pressure in the upper and lower chambers will become the same, the membrane will abut against the seat of the distribution valve and the fuel supply will stop.

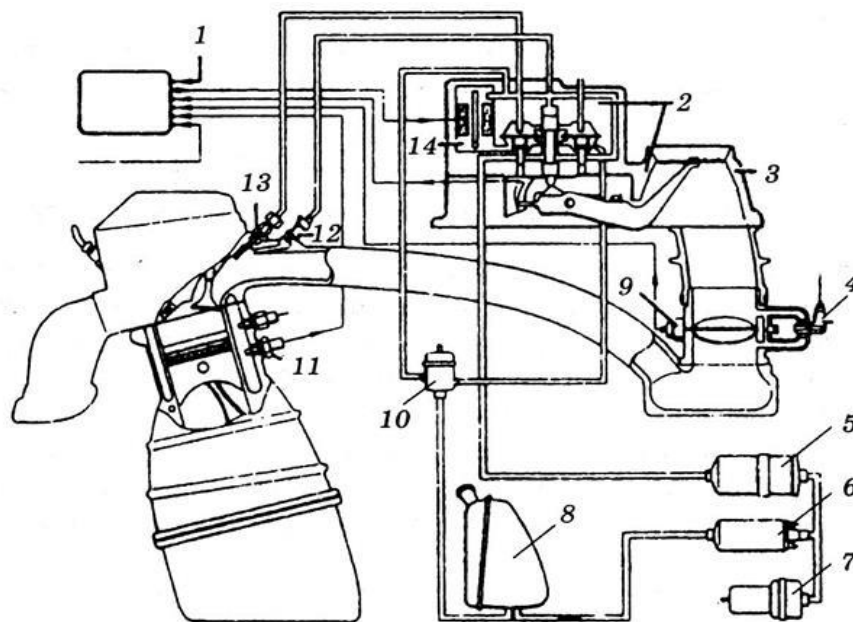


Figure 2. Functional diagram of the fuel supply control system to the engine of a car from the company "Bosch": 1 - electronic control unit; 2 - fuel dispenser-distributor; 3 - air flow meter; 4 – valve of additional air supply; 5 - fuel filter; 6 - fuel pump; 7 - fuel accumulator; 8 - fuel tank; 9 - throttle position switch; 10 - fuel pressure regulator in the system; 11 - coolant temperature sensor; 12 - starting nozzle; 13 - working nozzle 14 - electrohydraulic controlled pressure regulator

The coolant temperature sensor provides the controller with information about the thermal state of the engine, which is used to adjust the quantity and quality of the combustible mixture during cold engine start-up, during warm-up, in acceleration mode, etc. At the same time, an additional portion of air is supplied through the regulator 4 and an additional amount of fuel through the starting nozzle 12.

This system (like other similar engine control systems) allows, when operating according to a certain algorithm or if necessary, to reduce or stop the fuel supply to the nozzles and thus reduce the speed or completely stop the car. But it is not designed to automatically influence the speed of the car, and even more so to permanently limit the speed in accordance with traffic rules.

The analysis showed that at present the problem of limiting the speed of the vehicle so that it does not exceed the speed value permissible on a given section of the given road has not been solved. And this, according to experts of the Transport Forum [198], is in many ways the key to reducing accidents on highways. Although the prerequisites for performing such a task, as the analysis has shown, are. These are control systems for the operation of an automobile engine with microprocessor-based regulation of fuel supply to the engine injectors, and the rapid development of microprocessor and information technologies, and other achievements of science and technology.

Based on the analysis, we formulated the goal of the research, which is to create a method and device for remote forced speed limitation of cars on roads within the city and outside it in accordance with the speed limit adopted in a given place.

In order to implement the proposed method of remote forced speed limitation of a car (RFSL), it is necessary to solve a number of tasks:

- 1) develop a functional diagram of the device for RFSL;
- 2) develop a schematic diagram of the device;
- 3) assemble and test a full-scale model of the device in laboratory conditions to experimentally confirm the validity of the proposed method of remote forced speed limitation of a car;
- 4) test the device on a car using a reference signal;

5) resolve the issue of the possibility of using carrier frequencies of mobile operators to transmit a limiting signal;

6) investigate the possibility of using an existing or creating a special GSM transmitter to transmit a limiting signal;

7) in the case of using a special GSM transmitter or a transmitter of another type, develop a scheme for covering all roads in Ukraine with these transmitters.

Each of these tasks in itself is a separate serious research work. The author sees the tasks set as quite broad, especially in terms of implementation in real transport systems and conditions (on the streets and roads of the surrounding areas). These are the frequency of transmitters emitting a control signal, and algorithms for controlling fuel supply to the engine, and the safety of the car and the safety of the driver, passengers and cargo of the vehicle, and the transmission of a limiting signal, and much more.

Therefore, the task of this article is to formulate a concept for improving safety on Ukrainian highways in terms of reducing vehicle speeds to the maximum permissible values for these highways (the concept is outlined and substantiated above), as well as to develop a functional diagram of the RFSL device.

The method of improving road safety by means of remote forced speed limitation of vehicles on roads within the city and outside it in accordance with the speed limit adopted in a given place consists in the constant transmission of a signal via mobile or any other communication networks that carries information about the speed limit in a specific place on a specific highway. This signal, after reception, is processed in the microprocessor control system for fuel supply to the car engine according to a certain algorithm in order to maintain the speed of the car, which does not exceed the limit value.

Moreover, the driver of the vehicle could not even if he wanted to bypass such a restriction. For example, within the city limits 50 km / h, and on highways 90 km / h.

The formal and technical prerequisites for implementing the proposed method of increasing safety on the roads of Ukraine and, perhaps, any country in the world are the following:

- a) huge moral and material damage from accidents on the roads and the desire to minimize it among the authorities, the expert community and civil society;
- b) the development of microprocessor technology and mechatronics in transport;
- c) total coverage of the roads of Ukraine with the GSM-telephony network;
- d) the development of mobile telephony, including 4G and 5G technologies.

The functional diagrams of the RFSL device are designed for the main types of engine control systems in modern cars (with microprocessor control), which differ in some details. These are differences in the method of regulating the fuel supply to magnetoelectric injectors, in the types of control devices, which differ in speed and volume of operational and permanent memory, which entails a different approach to the algorithmization of car control processes, etc. In Fig. 3, a generalized functional diagram of the method of remote forced speed limitation of a car device is shown, which can become, in our opinion, universal for all types of modern cars.

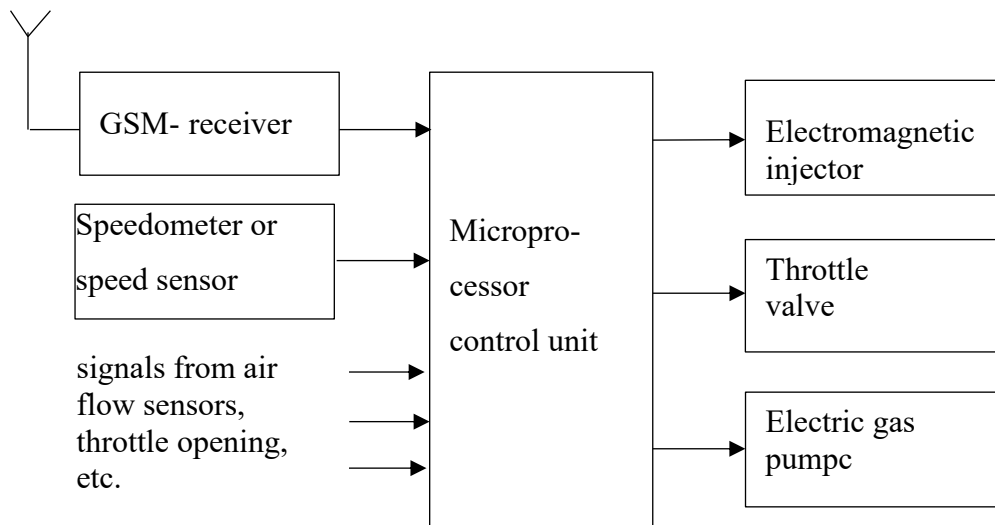


Figure 3. Functional diagram of a device for
remote forced vehicle speed limitation

The method of remote forced speed limitation of a car works as follows. The GSM receiver (possibly another radio receiving device) constantly receives a signal that carries the speed value permissible on a given road. In the microprocessor control unit (MCU), this value is compared with the signal from a digital speedometer or speed

sensor, which is the current value of the car's speed. The discrepancy between these two signals or the excess of the car's speed over the permissible speed value on a given road serves as the basis for recalculating the amount of fuel required to be supplied to the injector by the MCU block according to the programmed algorithm, as well as for reducing the duration of the injector opening. Reducing the fuel supply to the engine cylinders leads to a decrease in the car's speed to acceptable values. The described process of forced speed limitation of a car is quite complicated, because it is necessary not only to reduce the speed of the vehicle, but to do this without harm to all road users, without exception, for the economy of the driving cycle and other indicators. It will be necessary to take into account by the microprocessor control unit all the information coming from various sensors and to form, taking into account this information, a control effect on the electromagnetic injectors. And this, in turn, will cause some changes in other algorithms and programs embedded in the MCU.

Thus, a method for reducing accidents on highways in the part that depends on the speed regime of vehicles has been proposed and developed. The method and device that implements it remotely and forcibly limit the speed of vehicles depending on the value of the permissible speed on a given section of the road.

When creating a method for remote forced speed limitation of a car, an analysis of existing means and devices for forced speed limitation was carried out, which showed the absence of remote solutions to this problem at the moment.

Remoteness is carried out by receiving a signal on each car that carries the value of the permissible speed on a given section. Such a signal is transmitted either by mobile operator stations. The standard microprocessor control units on each car compare the value of the limiting signal with the current speed value, and if the latter exceeds the limit value, reduce the fuel supply to the engine cylinders.

We have developed functional diagrams of devices for implementing the proposed method on the main types of engine control systems in modern cars. As an example, a generalized universal functional diagram of a device for remote forced speed limitation of a car belonging to the economy class, i.e. minimally equipped with electronic means and devices, is given.

As a continuation of this research, the author is engaged in the manufacture of an experimental device RFSL and its full-scale tests with imitation of a limiting signal from mobile communication base stations. Of course, during martial law this is almost impossible, because the author lives in Kharkiv. All workshops in higher educational institutions are not functioning. Now we are testing the functioning of the device when interacting with a signal that will be emitted by real stations. Unfortunately, the full-scale war slowed down these works as well. You have to do this at your own expense in your own car. This requires interaction with the management of the mobile operator to allocate a small network resource for testing the device. Under martial law, this is impossible. In the future, the allocation of a frequency for transmitting a restrictive signal will need to be decided at the regional or state level, because this will allow us to offer our society and the state a way to radically improve road safety (of course, together with other measures in this direction), which will avoid huge human casualties and material losses.

Let's return to the study [198]. Having collected and studied data from a hundred countries on road safety levels, modern strategies for the latter, on the costs associated with road accidents and the costs of improving road safety, experts concluded that the level of road safety can be increased in the short term by solving two main problems:

1. Enforcing compliance with existing speed limits;
2. Reducing drunk driving.

We have already made some developments on the first problem, as discussed above. Now let's turn our attention to solving the second problem - making it impossible for drivers to drive while intoxicated.

The risk of a road traffic accident increases with the driver's blood alcohol content, and the higher the alcohol level, the greater the risk. Driving under the influence of alcohol, above the legal limit, is a registered factor in fatal accidents in most countries, and its share in all driver fatalities can range from relatively low, around 5% in countries such as Mexico, Bulgaria, the Czech Republic, Portugal and Romania, to high, between 30 and 40% in countries such as Canada, Slovenia, the

United States, France, Ireland and New Zealand [198]. Around 25% of all road deaths in Europe are alcohol-related.

In order to reduce the number of accidents caused by drunk driving, the installation of anti-alcohol interlocks on the cars of first-time but dangerous offenders and all repeat offenders has been introduced in the USA and some European countries, in combination with a driving skills improvement course and a medical counseling program in case of suspected alcohol dependence.

Interlocks have significant potential to reduce this problem, especially if they are installed almost immediately after the offense and if the installation is accompanied by medical counseling and treatment programs for alcoholism.

Experts [198] believe that there is a potential to completely eliminate drunk driving as a road safety problem if anti-alcohol interlocks are installed on all vehicles, and not just on cars of repeat offenders. However, in most countries, before introducing a mandatory requirement for the installation of such interlocks on all cars, it is necessary to convince the general public of its value and technical reliability.

A conscientious driver of a vehicle is not limited in his capabilities by anti-alcohol blocking, and he will probably be understanding of some possible inconveniences. After all, a drunk driver is a potential threat to any citizen of Ukraine, including family members of a conscientious driver.

But when developing methods for anti-alcohol blocking of cars and designing devices for their implementation, it is necessary to take into account all possible negative consequences of this intervention in the design of the car.

On the other hand, the design of such devices should ensure the unambiguous detection of drunk drivers and not allow these drivers to drive a vehicle.

A search in the Ukrainian information space for anti-alcohol blocking of vehicles did not yield any results - no information on this topic was found. A patent search in Ukraine also did not yield any results - no copyright certificates on this topic were found. In general, strangely enough, this problem (as well as the problem of forced compliance with existing speed limits by drivers of vehicles) is not addressed not only in Ukraine and Russia, but also in many other countries of the world.

Thus, the analysis showed that at present the task of making it impossible for drivers to drive vehicles while intoxicated has not been solved in Ukraine. And this is precisely what, according to experts of the Transport Forum [198], is largely the key to reducing the accident rate on highways.

The prerequisites for fulfilling such a task are, firstly, the desire of society to live in a safe environment, and, secondly, the rapid development of microprocessor technology and information technologies.

Based on the analysis, we formulated the goal of another study (for this work), which is to develop a method and device for making it impossible for drivers to drive vehicles while intoxicated.

In order to implement the proposed method of anti-alcohol blocking based on modern information technologies, it is necessary to solve a number of problems [202]:

- 1) formulate a concept for improving road safety in Ukraine in terms of preventing drivers from driving while intoxicated;
- 2) develop a functional diagram of a device for anti-alcohol blocking of vehicles;
- 3) develop an electrical schematic diagram of such a device;
- 4) assemble and test a full-scale sample of the blocking device in laboratory conditions to experimentally confirm the operability of the proposed method;
- 5) test the device on a car at reference values of the alcohol content in the driver's blood;
- 6) resolve possible issues regarding the use of a video camera in this device for driver identification.

It is possible that in the course of solving these problems, other problems will arise.

Solving each of these problems in itself is a separate serious research work. We see the tasks set as quite broad, especially in terms of implementation in real vehicles. This is the calibration of the sensitive element of the anti-alcohol blocker, driver identification, an algorithm for safely stopping the vehicle and stopping the fuel supply to the engine, the safety of the vehicle and the safety of the driver, passengers and the vehicle's cargo.

Therefore, the primary task is to formulate a concept for improving safety on the roads of Ukraine in the part caused by the driving of vehicles (Vehicles) by drunk drivers, develop a method for preventing such driving and design and test a device implementing such a method.

The method for improving road safety by preventing the driving of vehicles by drunk drivers is as follows.

In the cabin of the vehicle, in the immediate vicinity of the driver, there is a sensor that recognizes alcohol vapors in the air. The corresponding electrical signal from the sensor is sent to the microprocessor, which measures the signal level from the sensor and, in accordance with the action program, performs certain procedures.

The content of these procedures depends on many factors. Some countries (and even some states in the US) have laws that allow the use of ignition interlock devices as an alternative to punishment for drunk drivers. The US proposes the installation of ignition interlock devices (IEDs) with different installation thresholds. The criminal process thresholds for installation requirements vary from a minimum blood alcohol level (e.g. 0.2%) to a repeat offense, with about half of the states requiring installation on a first offense.

Most states have a “zero tolerance” level (set either at a level corresponding to cooking alcohol or measurement errors). In general, the US has developed and detailed legislation relating to anti-alcohol IEDs. Ukraine may borrow some of its provisions if it adopts the concept of using anti-alcohol interlock devices. But such measures are not even discussed in Ukraine today.

Some politicians in Sweden, Japan, Canada, the United States, and other countries are calling for such devices to be installed as standard equipment on all cars sold. Problems that need to be addressed, in addition to consumer and voter acceptance of such calls, include the difficulty of obtaining accurate measurements and the need to achieve high reliability so as not to interfere with the usability of the vehicle [198].

In Ukraine, the situation with accidents caused by drunk driving is no better. According to the Patrol Police, 1,400 road accidents due to drunk driving were recorded in the first 10 months of this year. This is 25.2% more than in the same period

last year. As a result of these accidents, 1,360 people were injured and 78 died. For comparison, the number of people killed as a result of drunk driving in 2018 was 87 [201].

Therefore, in our opinion, it is necessary to introduce anti-alcohol ignition interlock devices by law in Ukraine. All increases in the amount of fines for driving a vehicle under the influence of alcohol for many years have not brought any results. At the same time, explanatory work with society is necessary regarding all aspects of the use of anti-alcohol ignition interlock devices.

The previous section concluded that it is necessary to introduce mandatory equipment of all cars in Ukraine with anti-alcohol interlock devices, which should make it practically impossible for drunk drivers to drive vehicles.

This section proposes the most optimal method of such blocking. The task is not so simple, because blocking the ignition, for example, while the vehicle is moving, can lead to unpredictable consequences not only for the blocked vehicle, but also for vehicles that are under the control of conscientious drivers.

Having analyzed several possible options for the functioning of anti-alcohol ignition interlock devices, we settled on the following method.

The sensor that diagnoses alcohol vapors is installed in the place closest to the driver's face. Since modern alcohol vapor sensors are small in size, the installation location can be both the steering wheel and the dashboard.

In the USA, devices containing such sensors have dimensions of approximately 100×50×, have an exhalation fitting and are connected to the dashboard with a hose 70-80 cm long. In our opinion, this design provides an opportunity for abuse. For example, the front passenger can exhale into the anti-alcohol blocking device instead of the driver. Thus, additional protective measures are required for the functioning of such a device.

In the anti-alcohol blocking method we propose, such a falsification is much more difficult, because the alcohol vapors exhaled by the drunk driver must inevitably reach the sensitive element of the sensor, mounted, for example, in the steering wheel rim.

If alcohol vapors are present in the air exhaled by the driver, the anti-alcohol blocking device must open the electrical circuits of the ignition and starter power supply, as a result of which the vehicle will not be able to move off.

To exclude other possible cases of driving a vehicle by drivers under the influence of alcohol, the alcohol vapor sensor must be periodically turned on when the engine is running, that is, while the vehicle is moving. Or imagine a situation when someone from the acquaintances of a drunk driver starts the engine, and then transfers control of the vehicle to the latter. Such cases must be taken into account and excluded by software.

On the other hand, the software of the blocking device must take into account the safety requirements of both the blocked and surrounding vehicles. When blocking, for example, there should be no sudden stop of the vehicle while driving. In this case, the car must smoothly reduce speed to a complete stop with the inclusion of sound and light signaling.

Fig. 4 shows a structural diagram of the developed method for reducing road accidents.

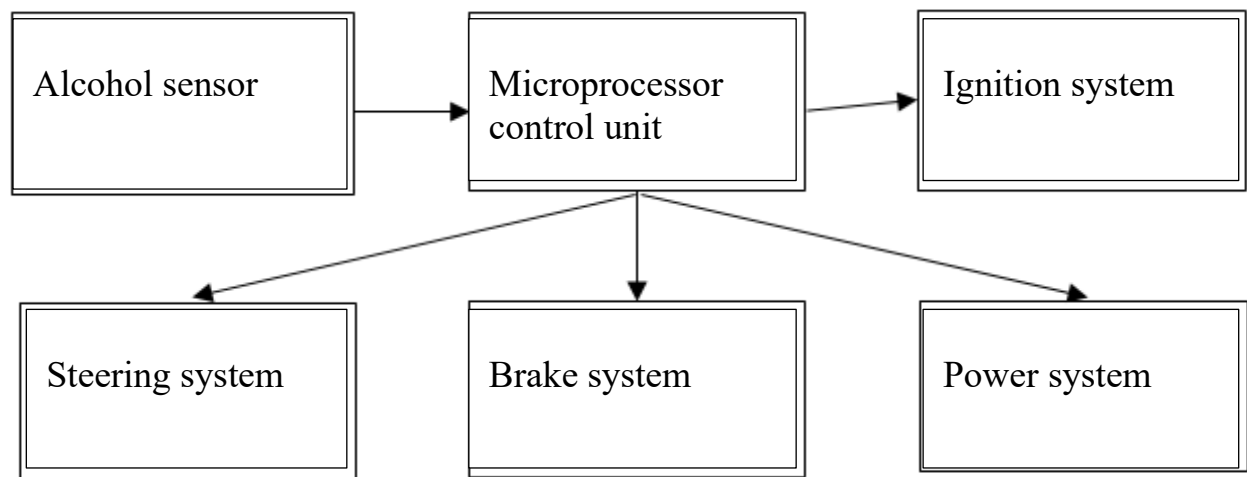


Figure 4. Block diagram of a method for preventing
drunk drivers from driving vehicles

The above diagram is enlarged and consists of the main functional blocks. In case of receiving a signal from the sensor about the presence of alcohol vapors in the air exhaled by the driver, the microprocessor control unit generates a signal to open for the normally closed relay contacts that provide electrical power to the starter, ignition

and electric fuel pump of the vehicle, which prevents the engine of the latter from starting, thereby preventing drunk driving with unpredictable consequences.

Thus, the method of anti-alcohol blocking of the vehicle proposed by us consists in unconditionally blocking the ignition and blocking the start of the vehicle engine according to the signal from the sensor about the presence of alcohol vapors in the air exhaled by the driver, in order to prevent the vehicle from being driven by a drunk driver. This will require some changes in the software of the microprocessor control unit of the vehicle.

The formal and technical prerequisites for implementing the proposed method of increasing safety on Ukrainian roads are as follows:

- 1) huge moral and material losses from accidents on roads and the desire to minimize them among the authorities, the expert community and civil society;
- 2) the development of microprocessor technology and mechatronics in general and in transport separately;
- 3) total coverage of Ukrainian roads with the GSM-telephony network and the Internet.

Thus, a method of reducing accidents on roads in the part that depends on the driving of vehicles by drivers in a state of intoxication has been proposed and developed.

The purpose of this section is to develop and design a device that implements the proposed method of reducing the accident rate of vehicles in the previous section by prohibiting drivers from driving them in a state of intoxication. This is about the mandatory equipment of all cars with such devices, which should be established at the legislative level. Such a device can be designed for any vehicle with varying degrees of interference with the vehicle's equipment. The legislators will decide which design option to choose and what level of interference there should be with the vehicle's design and software.

It is obvious that additional research and testing of the developed devices will be required in order to select their optimal design and minimize possible emergency situations associated with the use of such devices while the vehicle is moving.

There are enough open questions regarding the use of devices for anti-alcohol blocking of vehicles. This includes equipping already operated vehicles with such devices, and the algorithm for stopping a moving vehicle in which alcohol vapors are detected in the cabin air, and many other questions. The scope of this study does not allow us to dwell on these issues in more detail. This is a completely different volume of funds for research, equipment, and time for their implementation.

We have taken certain steps in this direction. We have begun developing software for an anti-alcohol blocking device for various depths of implementation into conventional factory software. Below is the development of an entry-level anti-alcohol blocking device. The developed device implements the above-described method of anti-alcohol blocking of a vehicle without interfering with the latter's software, therefore this device can be installed on cars that are already in operation, without interfering with their design, as well as on cars of outdated designs that do not have microprocessor control units.

Fig. 5 shows a structural diagram of an anti-alcohol blocking device that implements the above-proposed method of reducing accidents on highways. The device is developed on the basis of a microprocessor and is autonomous in relation to the vehicle on which it is installed.

The developed device works as follows. According to the signal from the sensor about the presence of alcohol vapors in the air of the vehicle cabin, the microprocessor generates a control signal for a relay with normally closed contacts, through which the starter electric current passes. The relay contacts open, making it impossible to start the vehicle engine. In the same way, for safety reasons, the electric current supply to the gasoline pump is made impossible.

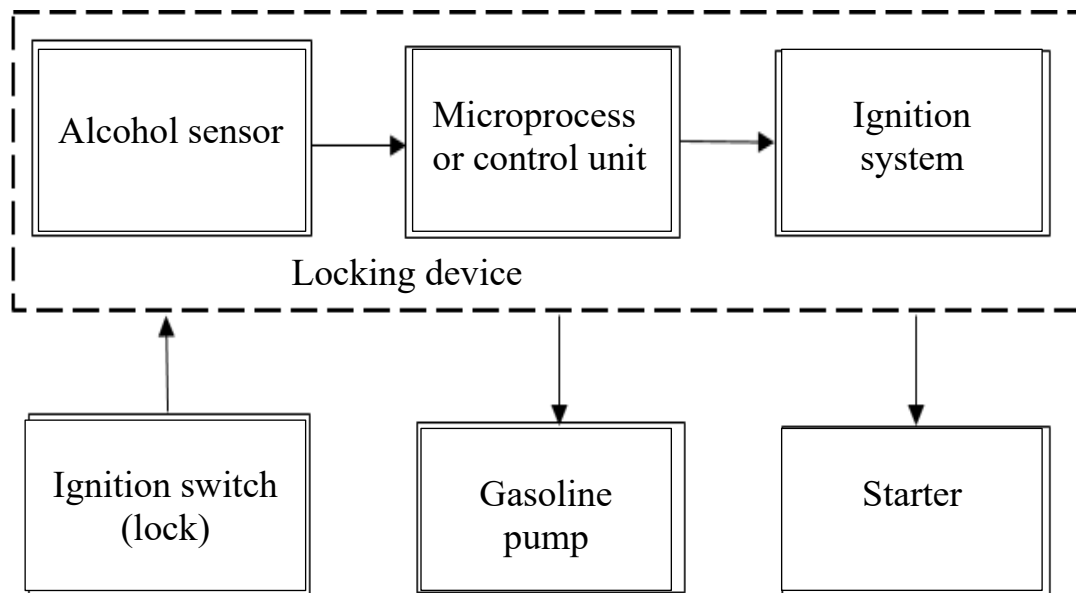


Figure 5. Block diagram of the anti-alcohol interlock device

The anti-alcohol blocking device was implemented by us on the basis of the Arduino microprocessor technology platform [203]. The choice of this platform is due to its wide distribution, the availability of a huge number of various sensors, microprocessors, various related radio electronic elements on sale, a relatively low price, the presence of a large library of programs, etc. The use of the C++ programming language allows the developer of devices on the Arduino platform to create software for projects himself. Microprocessors are programmed using a special software environment.

In addition, this platform has been designed for convenient installation of radio elements without soldering contacts. This point is especially important for us, since in the future it is planned to use this development as a basis for laboratory work when studying, for example, the discipline "Information technologies in vehicle control" or the discipline .

The Arduino Uno microprocessor system version R3 was chosen for the developed device. This is a printed circuit board based on the 8-bit ATmega328P microcontroller [203] (Fig. 6). Thus, the Arduino Uno board is an expansion board or an ATmega328P developer board.



Figure 6. Arduino Uno microprocessor system version R3: 1 – ATmega328P microcontroller; 2 – ATmega16U2 microcontroller; 3 – USB port of the board; 4 – power connector; 5 – 14 digital outputs; 6 – 6 analog outputs; 7 – power outputs

There is another auxiliary microcontroller ATmega16U2 on the board. Arduino Uno has 14 digital and 6 analog inputs/outputs (pins) adapted for removable mounting, a 16 MHz quartz crystal resonator, a USB output, a reset button, an output for connecting a power adapter (7-12 V) or a 9 V battery, a connector for programming the controller. In addition, the board has three ground outputs (GND), one output for 5 V, one for 3.3 V and a Vin pin for connecting an external power source or for obtaining

a voltage exceeding 5 V if the board is connected to an external power adapter (via USB, the power connection is limited to 5 V).

The ATmega328P microcontroller for Arduino Uno comes with a program loader, which allows you to download the program code without using an external programmer, but directly from a regular personal computer via the USB connector.

The MQ-3 gas sensor [204] was used as a sensor, designed to register and measure the concentration of alcohol vapor in the air (Fig. 7).



Figure 7. MQ-3 alcohol vapor sensor

For use as a starter power circuit breaker in the anti-alcohol interlock device, the HLS-13F-2 relay [205] (Fig. 8) was selected, designed for DC circuits with a voltage of 12 V and a current of up to 10 A with normally closed contacts. These parameters correspond to the currents and voltages that are possible when the device is operated in real vehicle conditions.

By combining the above components in accordance with the developed electrical circuit (Fig. 9), an anti-alcohol blocking device was developed for vehicles that do not have an electronic control unit.

The principle of operation of the anti-alcohol blocking device is as follows.



Figure 8. HLS-13F-2 relay

The basis of the device is the Arduino Uno printed circuit board with the ATmega328P microcontroller installed. The circuit (Fig. 9) shows only those contacts of the board (pin) that are involved in the operation of the device. They are easy to identify when installing the device by clearly visible marking (Fig. 6).

The MQ-3 sensor, placed in the car interior as close as possible to the driver's face and receiving 5V power from the GND and 5V contacts of the Arduino Uno board, constantly analyzes the composition of the air in the cabin. If alcohol vapors appear in the air, the MQ-3 sensor outputs a signal to pin A0 for the microcontroller.

Based on this signal, the microcontroller, in accordance with the program entered into it, generates a control pulse to operate the relay and transmits it to the digital output D10.

The relay operates and opens the starter power supply circuit, making it impossible for a drunk driver to start the engine. Along with the starter power supply circuit, the ignition coil power supply circuit may also be open.

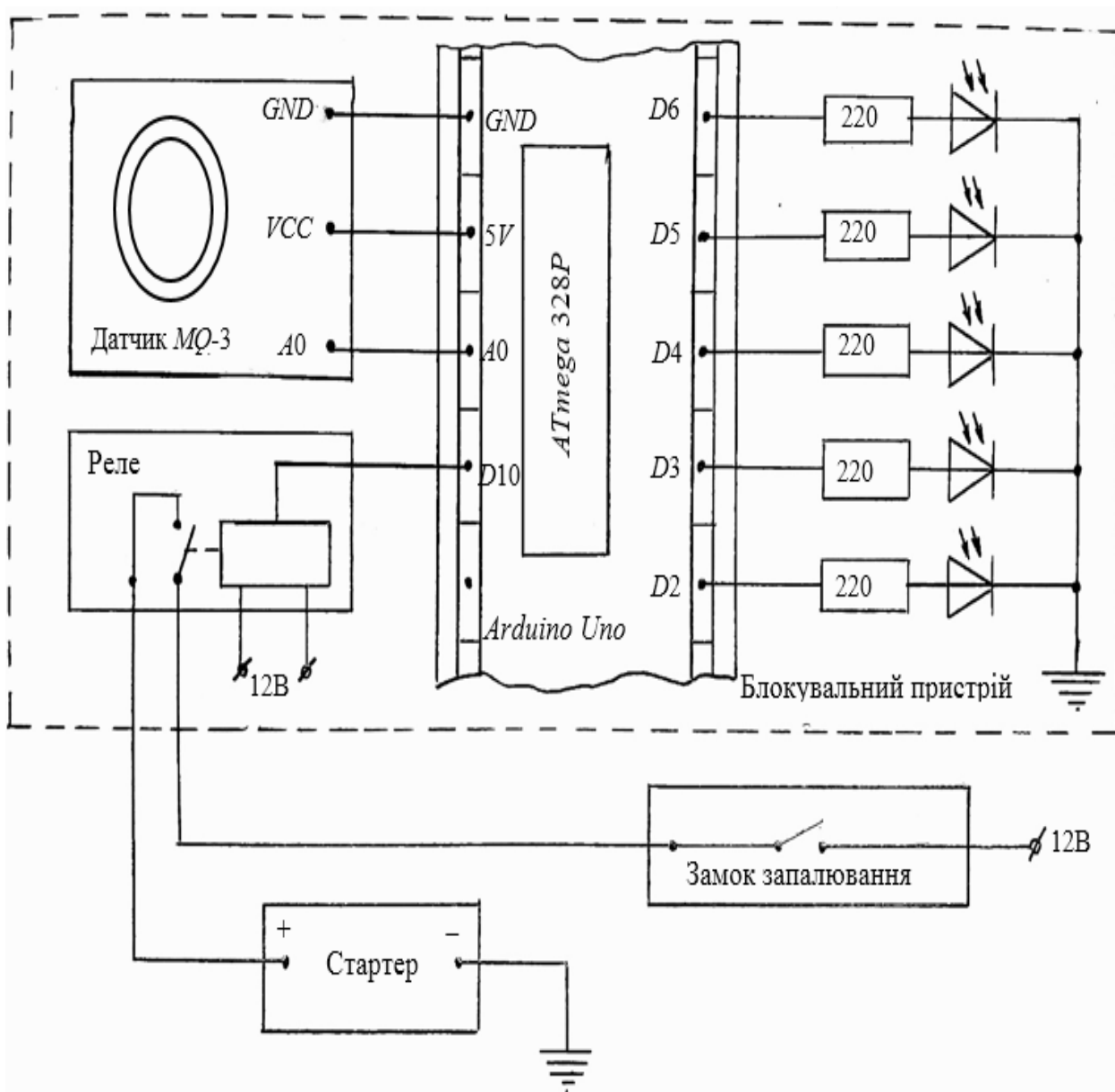


Figure 9. Electrical diagram of the anti-alcohol blocking device and its installation diagram on a car

In order for the created microprocessor anti-alcohol blocking device to perform its task of preventing drivers from driving while intoxicated, it is necessary to develop an algorithm for the operation of this device. Such an algorithm, on the one hand, must take into account the features of programming Arduino microprocessor systems, and on the other hand, the features of programming on-board computers of motor vehicles.

We have developed an algorithm that ensures the functioning of the anti-alcohol blocking device. In general, for modern vehicles, such an algorithm has a significant volume, since it interacts with the on-board software, and is also guided by the requirements for the safety of the driver and passengers.

In this work, we focused on the development of the algorithm that underlies the operation of the blocking device, the schematic electrical diagram of which is shown in Fig. 9. This blocking device has a simple design, operating principle and algorithm of operation, at the same time it clearly fulfills its purpose - to prevent a driver from driving a car while intoxicated.

Arduino microprocessor systems are programmed in the C ++ language. A program was developed that implemented the algorithm of the circuit (Fig. 9) for interrupting specified electrical circuits.

To enter the developed program into the microcontroller memory, the Arduino software environment in version 1.8.13 was used, which contains a text editor, an interface for communication with the microcontroller and a program debugger for the C ++ language. In addition, the monitor (a window on the screen that opens additionally) can display the values of the necessary variables (in our case, this is the alcohol content in the air near the MQ3 sensor).

The Arduino platform has significantly simplified the process of designing, programming and debugging microprocessor systems. The program developed for the designed device was loaded into a microcontroller connected to the computer using a regular USB cable. After correcting several spelling errors, the microprocessor system was debugged. More details about the experimental part of this study are described below.

For experimental testing of the anti-alcohol blocking device, it was mounted in full accordance with the developed electrical circuit (Fig. 7).

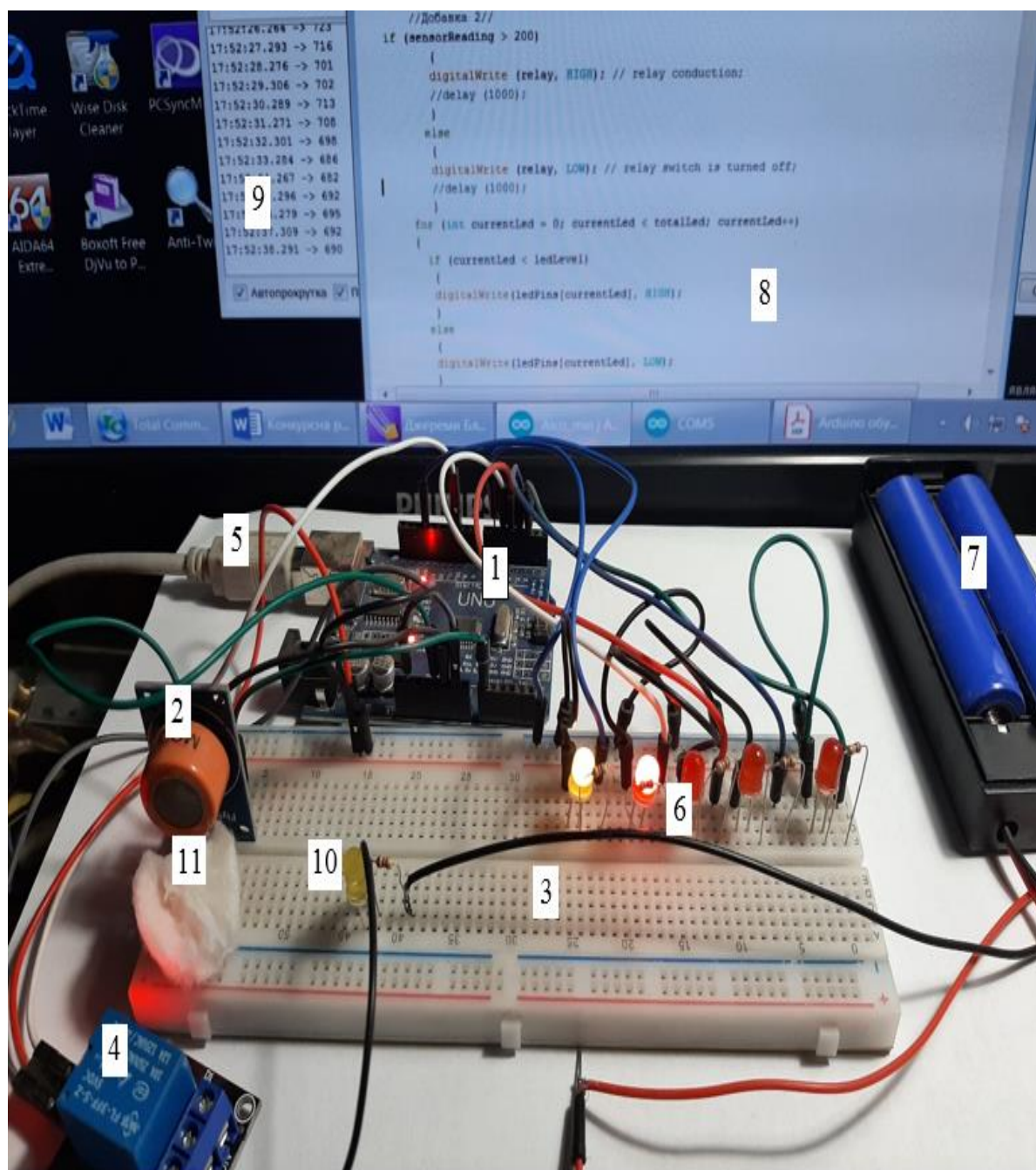


Fig. 10. Experimental verification of the device for anti-alcohol blocking of vehicles: 1 – Arduino Uno board; 2 – MQ3 sensor; 3 – breadboard; 4 – relay module; 5 – USB cable for connecting to a computer; 6 – five LEDs for indicating the value of the MQ3 signal; 7 – batteries; 8 – Arduino program window; 9 – monitor with signal values; 10 – signal LED; 11 – cotton wool with alcohol

LEDs 5 and resistors are connected to the Arduino Uno board 1 using conductors. The number of lit LEDs qualitatively indicates the degree of alcohol content in the air.

For assembly, a special breadboard for the Arduino 3 platform was used, which allows for detachable assembly. This is very important, because on the basis of the Arduino platform we are developing laboratory work for the discipline "Information technologies in vehicle control", and all elements of the circuit will be used several times.

When debugging the program and the device, the Arduino JQC-3FF relay module 2 was used for convenience. The relay of the module, according to the microcontroller signal, should interrupt the electrical circuit of the LED power supply from an autonomous source, which was used for greater reliability of the experiment.

The experiment was successful. Program 8 was entered into the microcontroller and configured using the Arduino software environment. After starting the program, cotton wool with alcohol 11 was brought to the sensor-sensor. LEDs 5 lit up in turn, indicating the presence of alcohol in the air. In addition, the current values of the alcohol content in the air were constantly displayed on the computer screen in a special monitor window 9. If the cotton wool with alcohol was moved away from the sensor, these values decreased almost to zero, and the LEDs gradually went out.

The developed program provides for entering a threshold value of the alcohol content in the air to turn on relay 4, that is, to open the power supply of the signal LED 10. The developed blocking device was tested for several threshold values. The relay always worked, and the signal LED went out when a given amount of alcohol was present in the air.

For a more reliable test of the blocking device, a circuit was assembled with a real car battery, relay and starter (Fig. 11).



Figure 11. Experimental verification of the blocking device with a car battery and a starter: 1 – Arduino Uno board; 2 – MQ3 sensor; 3 – breadboard; 4 – relay module; 5 – USB cable for connecting to a computer; 6 – five LEDs to indicate the value of the MQ3 signal; 7 – car battery; 8 – Arduino program window; 9 – monitor with signal values; 10 – starter; 11 – cotton wool with alcohol

In this circuit, the control signal from the microcontroller is sent to the car relay, which, if alcohol is present in the air, opens the electrical circuit of the starter power supply from the car battery, thus making it impossible for a driver who is in a drunken state to start the vehicle engine.

The HLS-13F automotive relay is designed for a voltage of 12 V and a current of up to 25 A, which significantly exceeds the parameters of the Arduino JQC-3FF relay and fully complies with the real operating conditions of the device in a vehicle.

The experiment was successful. The program was again entered into the microcontroller and configured using the Arduino software environment 8. After starting, cotton wool with alcohol 11 was brought to the sensor. LEDs 5 lit up, indicating the presence of alcohol in the air. The current values 9 of the alcohol content in the air were constantly displayed on the computer screen. When the threshold value of the alcohol content in the air was reached, the car relay was triggered, but the starter did not start. Thus, experimental testing of the anti-alcohol blocking device in conditions as close as possible to the real conditions of a motor vehicle showed the possibility of using such a device to prevent driving a vehicle while intoxicated.

The purpose of this study was to improve the safety of vehicle operation by developing a method based on modern information technologies to prevent drivers from driving vehicles while intoxicated and implementing such a method of an anti-alcohol blocking device.

We propose to introduce anti-alcohol blocking devices for the starter and ignition in Ukraine by law. Increasing the fines for driving a vehicle while intoxicated for many years has not yielded any results. At the same time, explanatory work with society on all aspects of the use of anti-alcohol UBZ is necessary.

When developing a method for disabling the control of a vehicle and a blocking device, an analysis of existing methods and devices for forcibly restricting the ability to drive vehicles by drivers in a state of intoxication was conducted, which showed the absence of solutions to this problem in Ukraine at the moment.

We have developed a method for increasing transport safety, based on the unconditional disabling of driving a vehicle by drivers in a state of intoxication, and its

structural diagram has been developed. A functional diagram of an anti-alcohol blocking device has also been developed for implementing the proposed method on modern cars, which requires changes in their software.

The implementation of the blocking device on cars without computer control is described, because on such vehicles this does not require reprogramming of the control unit. In this case, questions may arise regarding traffic safety, which will require additional research. An electrical circuit of such a device for vehicles has been developed, which involves the use of the Arduino microprocessor platform. Using Arduino allows the developer to assemble the device with the necessary properties and independently program the microprocessor to perform the necessary actions in a given sequence.

Thus, an anti-alcohol blocking device was designed, assembled, programmed with a specially developed program and experimentally tested. Experimental testing in conditions that are as close as possible to real ones (car starter and battery) showed that the developed device disconnects the starter from power supply in the presence of a given amount of alcohol in the air.

The price of the developed device, even taking into account taxes and deductions, is not an obstacle to equipping vehicles with anti-alcohol blocking devices. The cost of components as of May 1, 2025 is about 1000 UAH.

A continuation of this research may be the manufacture of a pre-production sample of the blocking device and its full-scale testing with reprogramming of on-board computers.

In general, the authors proposed and implemented two methods with devices to improve road safety (of course, together with other measures in this direction), which will avoid huge human casualties and material losses. These methods are associated with the software of the corresponding microprocessor equipment. The first of them is more difficult to implement in laboratory conditions, so we have made a more detailed description of the second method.

To solve the above problems of safe operation of vehicles, we have proposed a system for ensuring road safety (BDR).

This system consists of separate parts (Fig. 12), each of which can act independently, but the positive effect of implementing the BDR system when these parts interact is significantly enhanced when they are used together due to the exchange of information on road traffic.

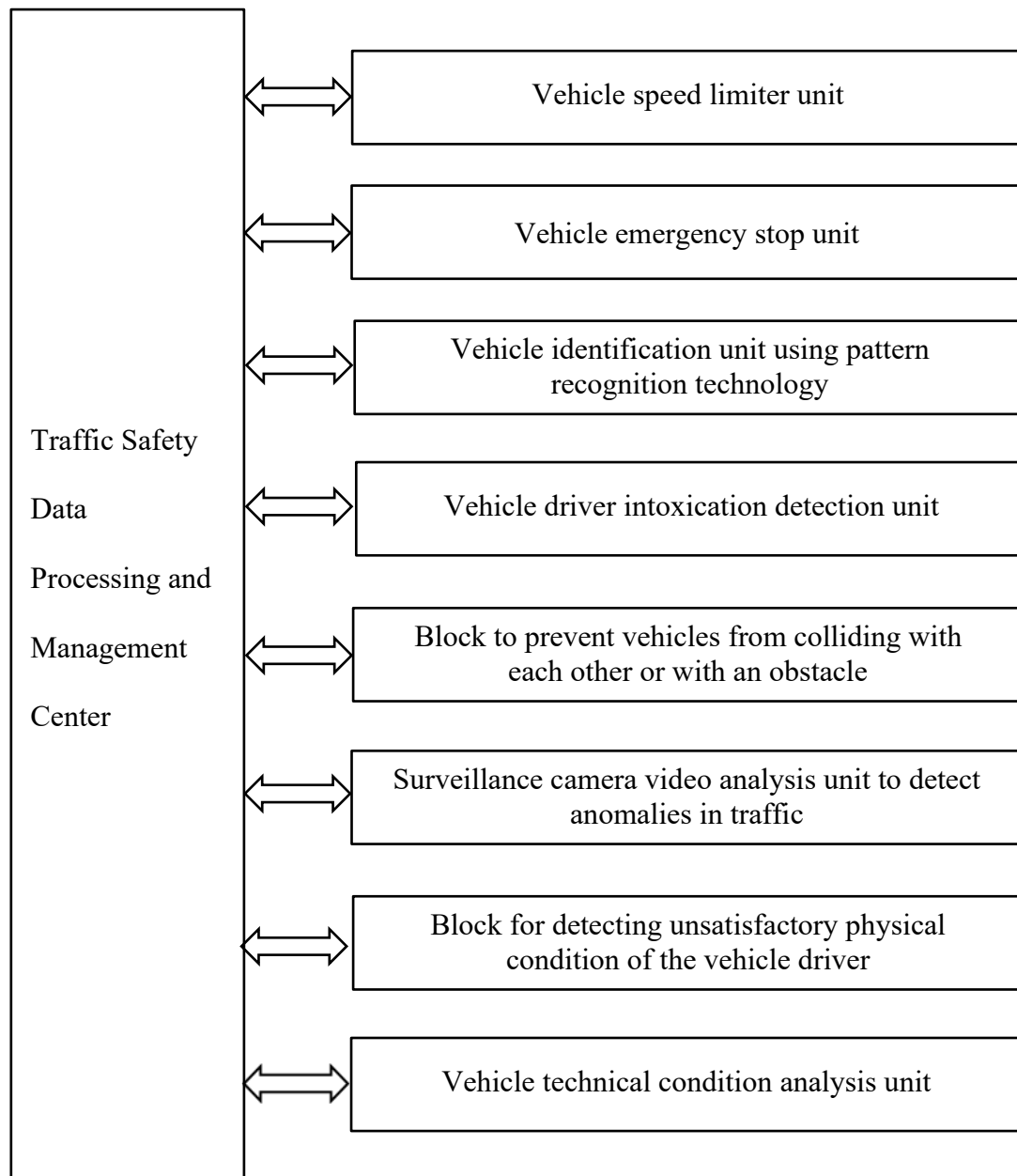


Figure 12. Functional diagram of the road safety system

The traffic safety system shown in Fig. 12 can be implemented at any level of transport systems, starting from the simplest ones. Additional blocks can be added to

it, for example, a block for analyzing the technical condition of the vehicle. Each block is the result of the interaction of software and microprocessor hardware, both individual, i.e. installed on the vehicle, and general, i.e. implemented at the server level.

The BDR system is currently implemented in the form of software algorithms that control the interaction of individual blocks, and its individual parts have a finished form and are almost all implemented on the basis of microprocessor technology. The concept of operation of most blocks (forced speed limit of the vehicle, forced stopping of the vehicle, detection of drunkenness of the driver of the vehicle, analysis of video footage from surveillance cameras in order to detect anomalies in road traffic) was proposed by the author of this study and is based on the use of information technologies.

It was noted above that the method of remote forced speed limit of the vehicle [201] works as follows. The GSM receiver (possibly another radio receiving device) constantly receives a signal that carries the value of the permissible speed for a given road or street. In the microprocessor control unit, this value is compared with the current value of the vehicle speed. Exceeding the vehicle speed above the permissible speed value on a given road is the basis for reducing the amount of fuel required to be supplied to the injector according to the programmed algorithm, as well as for reducing the duration of the injector opening, which leads to a decrease in the vehicle speed to acceptable values. Such devices should be installed on all vehicles (Vehicles), but at the first stage these may be public transport, vehicles of speeding violators and vehicles transporting dangerous goods.

Such an algorithm is also used by the vehicle forced stop unit. This function may be needed, for example, by patrol police officers pursuing violators or criminals. Other situations may arise when it is absolutely necessary to stop the vehicle. But this requires a database of vehicles in a large city or the entire country, containing passwords or access codes to the vehicle control system for the purpose of forced stopping of this vehicle. By the way, safe forced stopping of a vehicle on city streets or on a country road is not such a simple matter.

The vehicle identification block works on the basis of image recognition technology [206], which is based on the use of artificial intelligence. The operation of this block of the proposed traffic safety system is based on the use of state license plate recognition systems AutoTRASSIR, which are designed to automatically identify vehicle numbers that have fallen into the field of view of video cameras. In addition to performing functions for detecting traffic violators and others, this block is needed to find information about the vehicle registered in the corresponding database. Including the access code to the forced stopping system of this vehicle.

The second most important factor causing the occurrence of a road accident is the drunken state of the driver of a motor vehicle [198]. The author once proposed a solution to this problem using information technologies and microprocessor technology [202].

This concept will be appropriate to apply in the created road safety system in the unit for detecting the drunken state of vehicle drivers.

Another important component of the proposed safety system is the unit for analyzing the video series of surveillance cameras in order to detect anomalies in road traffic [207]. Such an anomaly in the course of transport processes is any deviation from the usual state, for example, the carriageway of streets, intersections, suburban highways. For example, this is the appearance of a stationary vehicle where cars usually move or the appearance of a person on the carriageway of the street outside the pedestrian crossing zone. The search for anomalies in video series is an ultramodern scientific direction using neural networks.

Unfortunately, the limited scope of the article does not allow discussing the tasks and features of other blocks shown in Fig. 1. Thus, the proposed road safety system should significantly increase the level of safety in transport by reducing cases of vehicle speeding and cases of drivers driving in a state of intoxication. The developed road safety system can be supplemented with other functional blocks that solve tasks related to the safety of vehicles, passengers, cargo, other road users and pedestrians.

To illustrate, let us consider point 5 of the recommendations of the experts of the Transport Forum [198], which deals with increasing the safety of vehicles in the part

that depends on the technical condition of these vehicles. So far, we have dealt with the human factor and its impact on the safety of passengers, the driver or drivers and the cargo and tried to minimize these impacts in every possible way. Now, at the end of this work, we will pay attention to factors related to the technical condition of the vehicle. Of course, here too, the participation of the human factor in various emergency situations can be found, but this is of a more indirect nature than in the cases considered above.

A characteristic feature of modern engine building is the desire for a comprehensive improvement in the efficiency, environmental friendliness and reliability of internal combustion engines (ICE). In addition, a mandatory condition for the development of new ICEs is the reduction of material and time costs for their design. The high complexity of modern engines and strict requirements for the timing of design and engineering work conflict with existing design methods, which can only be resolved using an adequate mathematical model of the processes occurring in the ICE.

To solve the problems of analyzing and optimizing the working processes of the designed engine at the required power and speed modes, the main problem is the identification of the mathematical model of the ICE. Identification of the mathematical model consists in determining both the structure of the model and its unknown parameters. With such a model, engine designers could develop optimal design solutions much faster, cheaper and more successfully. Currently, there is no single solution for a team of developers of a new ICE with specified characteristics. The problem is solved in different ways. Large companies and design bureaus finance the creation of the above-mentioned mathematical models of varying degrees of approximation or conduct a large number of full-scale tests to fine-tune the designs being developed. Those organizations that do not have such funds are practically deprived of the opportunity to create new engines with an optimal combination of efficiency, environmental friendliness and reliability.

At present, the known mathematical models of internal combustion engines do not fully reflect both the thermodynamic processes in the combustion chamber, in the

intake and exhaust manifolds, and the features of the interaction of the mixture formation and ignition systems, and the kinematic connections between various units and assemblies, as well as other processes occurring in the engine.

The choice of optimal parameters for the engine operating process and its design elements during experimental design work is extremely difficult. Therefore, many leading automobile companies and scientific organizations use the method of mathematical modeling of the real operating cycle of the engine and its systems, which reduces dependence on the manufacture of prototypes of internal combustion engines and their fine-tuning by trial and error. Designers, developers and researchers use mathematical models of individual processes and units of internal combustion engines in their practical activities, focusing on the aspects of engine operation that interest them in modeling. At the same time, the methods for solving the equations that make up such models are very complex. It seems important and possible to create a mathematical model of an internal combustion engine that would describe as fully as possible the entire diversity of processes occurring in the engine. In this case, first of all, methods for identifying the proposed mathematical model should be developed, which is a very difficult task. Moreover, the use of such a software product should be unambiguous and not cause difficulties for the creators of internal combustion engines.

Having studied several modern software packages for calculating internal combustion engines, the authors came to the following conclusions: The use of methods of mathematical modeling of working processes for fine-tuning the design of modern diesel engines and assessing their parameters at the stage of creating new modifications is a promising direction.

The use of modern software packages for CFD modeling (CFD - computational fluid dynamic) of diesel working processes has a number of advantages, both in terms of the accuracy of describing the combustion chamber configuration and in describing the in-cylinder processes themselves. The combination of numerical methods implemented in specialized software packages for modeling processes in internal combustion engines with an in-depth study of in-cylinder parameters of a diesel engine

with CFD modeling methods allows achieving the best result with minimal time expenditure.

The model is described by the following system of differential equations:

- the equation of balance of thermal energy in the zone of the unburned part of the charge;
- the equation of state of the unburned part of the charge; – the equation of balance of thermal energy of combustion products and a dozen other equations that take into account and describe in sufficient detail almost all processes occurring in the internal combustion engine.

The authors developed a mathematical model of the working cycle of the internal combustion engine with spark ignition in the form of a set of submodels consisting of an intake submodel, a compression submodel, a combustion and free expansion submodel and an exhaust submodel, as well as a submodel describing the main chemical reactions in the cylinder of the internal combustion engine, leading to the formation of NO_x, CO, CH, etc. In addition, each submodel includes algebraic equations describing the dependence of the thermodynamic parameters of the working fluid on its temperature.

As a result, the mathematical model of the working cycle of the internal combustion engine takes the form of a matrix differential equation, linear with respect to derivatives and solved using numerical integration methods.

It is not possible to provide an analysis of other sources, although there are very interesting studies and the results of their application.

Quite complex chemical, thermal, mechanical and electrical processes occur in an internal combustion engine. As a result, even the most complex engine models (nonlinear, non-stationary and with delay) are approximate and reflect the engine behavior only with a certain degree of accuracy. In addition, many engine parameters and characteristics cannot be accurately calculated analytically, but are established experimentally or must be evaluated by a control algorithm during its operation.

The block nature of the functional scheme 12 of the road safety system provides opportunities for adapting this scheme for various safety needs, adding certain blocks.

At the moment, for example, judging by the figure, there is one block that can be devoted to analyzing the technical condition of the vehicle.

The author proposes a subset of this block (additional blocks can be added depending on the need) to determine the technical state of the operating transport means. For whom will the results of the simulation of installations for the analysis of the technical parameters of the transport department be selected by means of a comprehensive selection of current methods of parametric identification and mathematical modeling of the technical systems of the transport department. As a result, this recommendation is transmitted to ensure the possibility of safe transportation at a specific moment to a specific transport facility.

5.5 Сукупність методів вирішення оптимізаційних завдань з використанням методів штучного інтелекту

Метаевристичні алгоритми широко застосовуються для оптимізації у різних завданнях, зокрема з метою відбору інформативних підмножин ознак при побудові моделі машинного навчання [208-222].

Видалення зайвих ознак допомагає уникнути перенавчання моделі та зменшити її складність. При використанні метаевристики, як інструменту відбору ознак необхідною умовою є здатність алгоритму здійснювати пошуку бінарному просторі [220-244]. Однак у той час, як деякі метаевристики, наприклад генетичний алгоритм, спочатку були створені для роботи з бінарними вхідними векторами, інші були розроблені для роботи в безперервній області пошуку. Очевидно, що тільки генетичний алгоритм не здатний бути універсальним інструментом для будь-яких даних, оскільки це суперечить теоремі про безкоштовні сніданки [245-257].

Найбільш відомим представником евристичних методів є ройовий інтелект, що описує колективну поведінку децентралізованої системи, що самоорганізується [208-231].

Існує велика кількість ройових алгоритмів, наприклад: метод рою частинок, мурашиний алгоритм, алгоритм зозулі, кажанів, риб, бджіл, колонізаційні алгоритми та ін. [232-282].

Використання ройових алгоритмів для пошуку рішень щодо стану об'єктів аналізу дозволяє здійснити:

- аналіз стійкості стану неоднорідних об'єктів в процесі бойового застосування (експлуатації);
- аналіз безпосереднього, агрегованого та опосередкованого взаємовпливу системних та зовнішніх факторів;
- оцінку досяжності цільових ситуацій управління об'єктами;
- сценарний аналіз при різних деструктивних впливах;

- прогноз зміни стану неоднорідних об'єктів при впливі дестабілізуючих факторів в ході бойового застосування (експлуатації);
- моделювання та аналіз динаміки зміни стану взаємозалежних параметрів неоднорідних об'єктів.

Разом з тим, використання наведених вище метаевристичних алгоритмів в канонічному вигляді не дозволяє отримати оперативну оцінку стану об'єкту з заданою достовірністю. Зазначене обумовлює пошук нових (удосконалення існуючих) підходів до оцінки та прогнозування стану об'єктів шляхом поєднання вже відомих ройових алгоритмів з їх подальшим удосконаленням.

5.5.1 Розробка методу управління групою безпілотних літальних апаратів з використанням популяційного алгоритму

Метод управління групою безпілотних літальних апаратів з використанням популяційного алгоритму складається з наступної послідовності дій:

Дія 1. Введення вихідних даних. На даному етапі вводяться вихідні дані, що наявні про БПЛА, з яких складається група, а також маршрут виконання польотного завдання, інформація про навколишнє середовище, рельєф місцевості та ін.

Дія 2. Ініціалізація та формування групи АБВ. На даному етапі генеруються початкові випадкові набори рішень, що представляють групи АБВ, з позначеними запахами лап окремих індивідів АБВ, які розглядаються як змінні рішення з сукупності наборів рішень. Математичне представлення випадково вибраної групи АБВ у межах їх певної території представлено наступним рівнянням:

$$P_{i,j} = P_{i,j}^{\min} + \left(\lambda \left(P_{i,j}^{\max} - P_{i,j}^{\min} \right) \right) \gamma, \quad (1)$$

де λ – випадкове число в діапазоні від 0 до 1, $P_{i,j}$ – i -те позначення лапи j -ї групи АБВ. Здійснюється розміщення сукупності АБВ у порядку зростання значень $f(P_i)$, обрання найкращого (P_i^{best}) та найгіршого рішення (P_i^{worst}), γ – ступінь невизначеності даних про маршрут руху групи БПЛА. Також на даному етапі

визначається цільова функція $f(P)$, розмір популяції (m) зграї АБВ, встановлюється кількість змінних (n), обмеження на значення змінних (LB, UB) і критерій завершення роботи алгоритму ($FE_{\max}$). Група бурих ведмедів вважається частиною популяції АБВ ($i = 1, 2, \dots, m$), а рівні АБВ у групі розглядаються як змінні рішення ($j = 1, 2, \dots, n$).

Дія 3. Нумерація АБВ в популяції, $i, i \in [0, S]$. На даному етапі кожному АБВ популяції присвоюється порядковий номер.

Дія 4. Визначення початкової швидкості АБВ популяції.

Початкова швидкість v_0 кожного АБВ популяції визначається наступним виразом:

$$v_i = (v_1, v_2 \dots v_S), v_i = v_0. \quad (2)$$

У плануванні запропонованого підходу позиція АБВ популяції в просторі вирішення проблем оновлюється на основі моделювання стратегій розвідки та експлуатації.

Дія 5. Попереднє оцінювання ділянки пошуку АБВ. В даній процедурі ділянка пошуку на природній мові визначається саме ореолом існування АБВ. Враховуючи, що джерела їжі АБВ різноманітні, проведемо сортування якості їжі.

Дія 6. Класифікація джерел їжі для АЗ.

Місцезнаходження найкращого джерела їжі (тобто мінімальна придатність) вважається (FS_{ht}) рослина їжа: ягоди, жолуді, горіхи, корені, клубні трав, яка знаходиться поряд та вимагає найменшої витрати енергії для її пошуку та здобування. Делікатесну їжу – мед позначимо як FS_{at} .

Інші не пріоритетні джерела харчування (їжа, яка необхідна для виживання особин) позначимо як FS_{nt} :

$$FS_{ht} = FS(\text{sorte\_index}(1)), \quad (3)$$

$$FS_{at}(1:4) = FS(\text{sorte\_index}(1:4)), \quad (4)$$

$$FS_{nt}(1:NP-4) = FS(\text{sorte\_index}(4: NP)). \quad (5)$$

Дія 7. Вибір техніки ходи АБВ.

Дія 7.1 Повертання ніг при ходьбі АБВ.

В зазначеній дії передбачається особлива манера ходьби, коли АБВ

повертають ноги, щоб уникнути попередніх западин на землі, і обережно крокують до необхідного місця. Ця спеціальна поведінка при ходьбі АБВ найчастіше спостерігається у самців АБВ. Математично цю поведінку можна змодельовати, як:

$$P_{i,j,k}^{new} = P_{i,j,k}^{old} - (\theta_k \alpha_{i,j,k} P_{i,j,k}^{old}), \quad (6)$$

де $P_{i,j,k}^{new}$ – оновлена мітка запаху лапи на k -й ітерації i -ї групи, створеної j -ою міткою лапи, θ_k – коефіцієнт повторюваності, що приймає значення від 0 до 1; $\alpha_{i,j,k}$ – випадкове число в діапазоні від 0 до 1.

Дія 7.2 Обережний крок АБВ.

Характеристика обережного кроку АБВ передбачає повторення відбитків лап шляхом перевірки попередньо позначених лап. Така поведінка допомагає ефективно попередити інших членів групи. Рівняння (7) представляє математичне формулювання техніки обережного кроку АБВ, яка спостерігається у АБВ:

$$P_{i,j,k}^{new} = P_{i,j,k}^{old} + F_k (P_{j,k}^{best} - L_k P_{j,k}^{worst}), \quad (7)$$

де F_k – коефіцієнт кроку; $P_{j,k}^{best}$, $P_{j,k}^{worst}$ – j -та найкраща і найгірша оцінка лапи АБВ на k -ій ітерації; L_k – довжина кроку АБВ на певній ітерації.

Дія 7.3 Скручування лап АБВ.

Третя унікальна поведінка при ходьбі, яка спостерігається у бурих ведмедів – це скручування лап. Самці бурого ведмеда зазвичай скручують ноги у попередньо сформовані сліди від лап, роблячи їх глибшими та виразнішими для легшої ідентифікації. Вибір типу сліду лапи базується на найгірших і найкращих слідах запаху лап АБВ, визначені в попередній ітерації. Математичне представлення поведінки скручених ніг описано рівнянням (8).

$$P_{i,j,k}^{new} = P_{i,j,k}^{old} + \omega_{i,k} (P_{j,k}^{best} - P_{i,j,k}^{old}) - \omega_{i,k} (P_{j,k}^{worst} - P_{i,j,k}^{old}), \quad (8)$$

де $\omega_{i,k}$ – кутова швидкість ніг на i -й мітці лапи та k -й ітерації.

Дія 8. Розміщення сукупності АБВ. На даному етапі здійснюється розміщення АБВ у порядку зростання значень цільової функції $f(P_i)$ і обирається

найкраще (P_i^{best}) і найгірше рішення (P_i^{worst}) .

Дія 9. Створення нової популяції АБВ:

$$P_{i,k}^{new} = P_{i,k}^{old} - (\theta_k \alpha_{i,k} P_{i,k}^{old}) \quad (9)$$

де $F_k = \beta_{1,k} \cdot \theta_k$, $L_k = 1 + \beta_{2,k}$ та $\beta_{1,k} \& \beta_{2,k}$ – випадкове число в діапазоні [207, с.1].

Дія 10. Розміщення сукупності АБВ. На даному етапі здійснюється розміщення АБВ у порядку зростання значень цільової функції $f(P_i)$ і обирається найкраще (P_i^{best}) і найгірше рішення (P_i^{worst}) .

Дія 11 Обнюхування АБВ. Суть поведінки АБВ полягає в тому, що АБВ нюхають один одного, щоб слідувати по слідам запаху членів своєї групи в правильному напрямку. Крім того, АБВ використовують обнюхування, щоб встановити власну територію та уникнути введення в оману слідами запаху лап інших АБВ. Математична модель поведінки обнюхування задана формулою (10):

$$P_{m,j,k}^{new} = \begin{cases} P_{m,j,k}^{old} + \lambda_{i,k} (P_{m,j,k}^{old} - P_{n,j,k}^{old}), & \text{if } f(P_{m,k}^{old}) < f(P_{n,k}^{old}), \\ P_{m,j,k}^{old} + \lambda_{i,k} (P_{n,j,k}^{old} - P_{m,j,k}^{old}), & \text{if } f(P_{n,k}^{old}) < f(P_{m,k}^{old}), \end{cases} \quad (10)$$

де $\lambda_{i,k}$ – рівномірно розподілене випадкове число, що знаходиться в діапазоні від 0 до 1; $P_{m,j,k}^{new}$ – оновлене розташування запаху на лапі з $m \neq n$;

$P_{m,k}^{old}$ та $P_{n,k}^{old}$ – значення функції придатності на k -й ітерації m і n груп відповідно. Процес оновлення для всіх описаних етапів застосовується до кожної групи АБВ, поки не буде виконано необхідний критерій.

Дія 12. Перевірка критерію зупинки. Алгоритм завершується, якщо виконано максимальну кількість ітерацій. В іншому випадку поведінка генерації нових місць і перевірки умов повторюється.

Дія 13. Навчання баз знань АБВ.

В зазначеному дослідженні для навчання баз знань кожного АБВ використовується розроблений у дослідженні [209] метод навчання на основі штучних нейронних мереж, що еволюціонують. Метод використовується для зміни характеру пересування кожного АБВ, для більш точних результатів аналізу

в подальшому.

Дія 14. Визначення кількості необхідних обчислювальних ресурсів, інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

З метою недопущення зациклювання обчислювань на діях 1–10 даного методу, та підвищення оперативності обчислювань додатково визначається завантаженість системи. При перевищенні визначеного порогу обчислювальної складності визначається кількість програмно-апаратних ресурсів які необхідно додатково залучити, за допомогою методу, запропонованого в роботі [238].

Кінець алгоритму.

Запропонований метод управління групою безпілотних літальних апаратів з використанням популяційного алгоритму. Для визначення ефективності запропонованого методу, проведено моделювання його роботи для вирішення завдання управління групою безпілотних літальних апаратів при заданих в розділі 4 початкових умовах.

Ефективність метод управління групою безпілотних літальних апаратів з використанням популяційного алгоритму порівнюється за допомогою функцій – вигляд яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Оцінка ефективності запропонованого методу управління за критерієм оперативності обробки інформації

Назва функції	Метрика	Алгоритм рою частинок	Алгоритм мурашиної колонії	Алгоритм чорної вдови	Алгоритм зграї сірих вовків	Канонічний алгоритм бурих ведмедів	Удосконалений алгоритм бурих ведмедів
U22-1	Середнє значення	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000
	Стандартне значення	2.17547E-07	1.94448E-07	1.73866E-07	1.73121E-07	1.51021E-07	1.72168E-07
B22-2	Середнє значення	400	400.265772	400.7973158	400.265772	400.3986579	400.5315439
	Стандартне значення	4.9898E-08	1.011427534	1.621892282	1.011427535	1.216419212	1.378343398
B22-3	Середнє значення	600.0071815	600.0644622	600.0240021	600.012832	600.031303	600.0449987

Продовження таблиці 1

	Стандарт не значення	0.021632777	0.184980091	0.115606243	0.053463097	0.147011513	0.101164243
B22-4	Середнє значення	826.5653461	827.3281442	823.8789639	826.3000191	826.2668486	825.7693662
	Стандарт не значення	9.13817552	8.364210734	11.30806963	8.186625055	9.136107323	10.05991317
B22-5	Середнє значення	900.743876	900.9504411	900.9726169	900.8007883	900.5452042	901.2016312
	Стандарт не значення	0.781626306	1.424558753	1.275779755	0.903385622	0.635781924	1.598982565
B22-6	Середнє значення	1888.524629	1874.869967	1876.294359	1847.184924	1888.926953	1842.878175
	Стандарт не значення	127.2561383	91.22185049	69.00003268	32.76980351	140.693674	31.32108747
H22-7	Середнє значення	2027.479588	2030.758499	2029.556604	2032.238674	2028.177978	2029.128603
	Стандарт не значення	6.106897592	8.027195324	5.81348717	7.446489204	8.003968446	8.197733191
H22-8	Середнє значення	2223.108804	2223.537417	2222.070633	2223.140251	2220.888475	2220.690533
	Стандарт не значення	4.749655105	2.963408213	4.895282849	3.995669404	5.451654006	6.337353983
H22-9	Середнє значення	2510.930321	2510.930321	2536.358938	2498.216012	2523.644629	2498.216012
	Стандарт не значення	65.93880108	65.93880108	85.778947	48.38585173	77.58997694	48.38585173
C22-10	Середнє значення	2594.615905	2596.833927	2585.256107	2591.210109	2605.304194	2619.308989
	Стандарт не значення	48.2013289	49.71807546	57.1034079	56.36586785	42.57395199	34.10382553
C22-11	Середнє значення	2695.981932	2685.587394	2733.855734	2710.621315	2700.168413	2715.332781
	Стандарт не значення	116.3652035	110.1475838	146.333679	118.5098748	113.7913849	109.3008673
C22-12	Середнє значення	2857.067086	2858.742176	2854.959949	2861.414681	2859.407788	2860.718769
	Стандарт не значення	9.364347909	14.88960231	5.539104327	17.96133754	15.00545163	16.34731781

В таблиці 2 наведено результати оцінки достовірності прийнятих рішень для кожного з методів оптимізації рішень для управління групою безпілотних літальних апаратів.

Таблиця 2

Оцінка ефективності запропонованого методу управління за критерієм
достовірності обробки інформації

Назва функції	Метрика	Алгоритм рою частинок	Алгоритм мурашиної колонії	Алгоритм чорної вдови	Алгоритм зграї сірих вовків	Канонічний алгоритм бурих ведмедів	Удосконалений алгоритм бурих ведмедів
U22-1	Середнє значення	0,66	0,73	0,67	0,68	0,8	0,9
	Стандартне значення	0,7	0,73	0,68	0,69	0,83	0,91
B22-2	Середнє значення	0,7	0,73	0,7	0,71	0,77	0,89
	Стандартне значення	0,71	0,73	0,72	0,72	0,76	0,9
B22-3	Середнє значення	0,68	0,73	0,7	0,71	0,76	0,92
	Стандартне значення	0,69	0,73	0,69	0,73	0,77	0,91
B22-4	Середнє значення	0,67	0,74	0,7	0,72	0,78	0,93
	Стандартне значення	0,67	0,72	0,67	0,72	0,79	0,92
B22-5	Середнє значення	0,6	0,71	0,64	0,73	0,8	0,91
	Стандартне значення	0,61	0,72	0,64	0,74	0,88	0,92
B22-6	Середнє значення	0,64	0,73	0,66	0,77	0,85	0,93
	Стандартне значення	0,66	0,75	0,66	0,78	0,83	0,92
H22-7	Середнє значення	0,67	0,72	0,68	0,75	0,81	0,9
	Стандартне значення	0,68	0,71	0,69	0,74	0,83	0,9
H22-8	Середнє значення	0,68	0,74	0,69	0,75	0,84	0,93
	Стандартне значення	0,65	0,74	0,67	0,77	0,81	0,91
H22-9	Середнє значення	0,64	0,75	0,66	0,69	0,83	0,91

Продовження таблиці 2

	Стандарт не значення	0,7	0,72	0,71	0,71	0,84	0,93
C22-10	Середнє значення	0,69	0,71	0,7	0,72	0,8	0,94
	Стандарт не значення	0,68	0,71	0,7	0,73	0,8	0,91
C22-11	Середнє значення	0,67	0,71	0,69	0,71	0,82	0,91
	Стандарт не значення	0,67	0,72	0,68	0,74	0,91	0,91
C22-12	Середнє значення	0,63	0,73	0,65	0,75	0,82	0,91
	Стандарт не значення	0,62	0,74	0,66	0,76	0,83	0,91

З аналізу табл. 1, 2 можна зробити висновки що запропонований метод забезпечую стабільну роботу алгоритму для основних тестових функцій унімодального та мультимодального виду.

Як видно з табл. 1–2 підвищення оперативності прийняття рішень досягається на рівня 15–18 % за рахунок використання додаткових процедур та забезпечення достовірності прийнятих рішень на рівні 0.9.

Зазначений метод дозволить:

- провести визначення оптимального маршруту польоту групи БпЛА по визначеному критерію оптимізації;
- визначити ефективні заходи для підвищення ефективності управління групою БпЛА;
- підвищити швидкість управління групою БпЛА при забезпеченні заданої достовірності прийняття рішень на керування маршрутом руху групи БпЛА;
- зменшити використання обчислювальних ресурсів систем підтримки прийняття рішень.

Обмеженнями дослідження є необхідність наявності початкової бази даних про маршрут групи руху групи БпЛА, необхідність врахування часу затримки на збір та доведення інформації від технічних засобів моніторингу групи БпЛА.

Запропонований підхід доцільно використовувати для вирішення управління польотом групи БпЛА, що характеризуються високим ступенем складності.

5.5.2 Розробка методу обробки гетерогенних даних в організаційно-технічних системах

Метод обробки гетерогенних даних в організаційно-технічних системах складається з наступної послідовності дій:

Дія 1. Введення вихідних даних. На даному етапі вводяться вихідні дані, що наявні про організаційно-технічну систему, а саме: кількість та тип засобів, які входять до її складу, тип даних, що циркулюють в організаційно-технічній системі, наявні обчислювальні ресурси, кількість та зв'язків між кожним елементом організаційно-технічної системи, інформація про технічні характеристики каналів управління та передачі даних, інформація про середовище застосування та ін.

Дія 2. Ініціалізація та формування кожної групи агентів комбінованого алгоритму.

На даному етапі генеруються початкові випадкові набори рішень, що представляють групи агентів комбінованого алгоритму.

Математичне представлення випадково вибраної групи агентів комбінованого алгоритму з сукупності можливих агентів у межах їх певної території математично описується наступним чином:

$$P_{i,j} = P_{i,j}^{\min} + \left(\lambda \left(P_{i,j}^{\max} - P_{i,j}^{\min} \right) \right) \gamma, \quad (11)$$

де λ – випадкове число в діапазоні від 0 до 1, $P_{i,j}$ – i -те позначення j -ї групи агентів комбінованого алгоритму. Здійснюється розміщення сукупності агентів комбінованого алгоритму в порядку зростання значень $f(P_i)$, обрання найкращого (P_i^{best}) та найгіршого рішення (P_i^{worst}), γ – ступінь невизначеності даних, що циркулюють в організаційно-технічній системі. Також на даному етапі визначається цільова функція обробки гетерогенних даних $f(P)$, розмір

популяції (m) зграї комбінованого алгоритму, встановлюється кількість змінних (n), обмеження на значення змінних (LB , UB) і критерій завершення роботи алгоритму ($FE_{\max}$).

Дія 3. Нумерація агентів комбінованого алгоритму в популяції, $i, i \in [0, S]$.

На даному етапі кожному агенту зграї комбінованого алгоритму в популяції присвоюється порядковий номер.

Дія 4. Визначення початкової швидкості агентів комбінованого алгоритму в популяції.

Початкова швидкість v_0 кожного агента в популяції визначається наступним виразом:

$$v_i = (v_1, v_2 \dots v_S), v_i = v_0. \quad (12)$$

Дія 5. Попереднє оцінювання ділянки пошуку агентами зграї комбінованого алгоритму. В даній процедурі ділянка пошуку на природній мові визначається саме ореолом для кожної з груп зграї комбінованого алгоритму.

Дія 6. Класифікація джерел їжі для агентів зграї комбінованого алгоритму.

Місцезнаходження найкращого джерела їжі (тобто мінімальна придатність) вважається (FS_{ht}) їжа, яка знаходиться поряд та вимагає найменшої витрати енергії для її пошуку та здобування. Делікатесна їжа, яка вимагає найбільших затрат на її здобування позначимо як FS_{at} .

Інші не пріоритетні джерела харчування (їжа, яка необхідна для виживання особин) позначимо як FS_{nt} :

$$FS_{ht} = FS(\text{sorte\_index}(1)), \quad (13)$$

$$FS_{at}(1:4) = FS(\text{sorte\_index}(1:3)), \quad (14)$$

$$FS_{nt}(1:NP-4) = FS(\text{sorte\_index}(6: NP)). \quad (15)$$

Дія 7. Виконання процедур алгоритму зграї гепардів.

Дія 7.1 Пошукова поведінка агентів гепардів.

Ця поведінка відображає ситуацію, коли гепард шукає здобич. Гепарди використовують два методи пошуку здобичі: очікування чи активне дослідження навколишньої території. В нашому випадку навколишнє середовище це простір

вирішення завдання обробки гетерогенних даних. Пошукову поведінку агентів гепардів пропонується моделювати за допомогою наступного рівняння:

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + \hat{r}_{i,j}^{-1} \alpha_{i,j}^t, \quad (16)$$

де $X_{i,j}^t$ – поточна позиція групи агентів гепардів i або окремих особин агентів гепардів i ($i=1,2,\dots,n$) у популяції j або у площині простору пошуку j ($j=1,2,\dots,d$), де n – кількість агентства гепардів у популяції, а d – це розмірність оптимізаційного завдання. $X_{i,j}^{t+1}$ – наступна позиція агента гепарда, t – час полювання агентів гепардів, T – максимальний час полювання, $\hat{r}_{i,j}^{-1}$ – параметр рандомізації, $\alpha_{i,j}^t$ – довжина кроку для агента гепарда i у популяції j . Параметр рандомізації $\hat{r}_{i,j}$ розподіляється як випадкові числа за стандартним нормальним розподілом. Довжина кроку $\alpha_{i,j}^t > 0$ встановлена на $0.001 \times t/T$, оскільки гепарди є повільними шукачами.

Дія 7.2 Стратегія очікування агентів-гепардів.

Стратегія очікування формально описується наступним чином:

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t, \quad (17)$$

де $X_{i,j}^{t+1}$, $X_{i,j}^t$ – нова позиція агента гепарда i у популяції j , відповідно. Запропонована стратегія передбачає впровадження спеціального підходу до координації в алгоритмі оптимізації, коли всі агенти в групі атакують одночасно. Такий підхід значно збільшує ймовірність успішного полювання та знижує ризик передчасного зближення до джерел харчування.

Дія 7.3 Активна атаквальна поведінка агентів гепардів.

Зазначена процедура описує дві ключові характеристики етапу активного полювання, а саме: швидкість та гнучкість. Важливо зазначити, що гепарди не використовують групові тактики під час полювання, і всі їхні стратегії атаки можна математично визначити:

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{B,j}^t + \hat{r}_{i,j} \cdot \beta_{i,j}^t, \quad (18)$$

де $X_{B,j}^t$ – поточна позиція здобичі на площині пошуку j ; $\hat{r}_{i,j}$, $\beta_{i,j}^t$ – фактори повороту та взаємодії, пов'язані з гепардом i на площині пошуку j , $\hat{r}_{i,j}$ – випадкове

значення, яке описується $|\hat{r}_{i,j}|^{\exp(r_{i,j}/2)} \sin(2\pi r_{i,j})$ та $r_{i,j}$ – випадкове число з нормального розподілу.

Дія 8. Виконання процедур алгоритму рою частинок.

8.1 Оновлення швидкості агентів рою частинок.

Генерація швидкості агентів рою частинок розраховується відповідно до двох параметрів: глобальної найкращої частинки G_{best} і локальної найкращої частинки L_{best} . Швидкості оновлюються за наступним рівнянням:

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + c_1 r_{1i}^t (L_{best}^t - x_i^t) + c_2 r_{2i}^t (G_{best}^t - x_i^t), \quad (19)$$

де V_i^{t+1} – швидкість частинки на ітерації $(t+1)$, V_i^t – швидкість частинки на попередній ітерації, x_i^t , r_{1i}^t , r_{2i}^t – вектори d -вимірних випадкових чисел, рівномірно розподілених між 0 і 1, що описує положення частинки i ; c_1 і c_2 – коефіцієнти навчання, ω – ваговий коефіцієнт, який зазвичай встановлюється на 1.

8.2 Переміщення частинок в просторі пошуку.

Нова позиція часток генерується відповідно до рівняння (10), де x_i^{t+1} – нова позиція часток, x_i^t – попередня позицією часток, V_i^{t+1} – швидкість часток, розрахована за рівнянням (9).

$$x_i^{t+1} = x_i^t + V_i^{t+1}. \quad (20)$$

Дія 9. Поєднання стратегій пошуку двох алгоритмів.

Після створення початкової популяції кожен агент отримує розмір популяції, який становить половину від початкової популяції, як це визначено в розглянутій роботі. Процес застосування метаевристичних операторів спрощується шляхом послідовного застосування поведінки алгоритму зграї гепардів та алгоритму зграї частинок, відповідно до їхніх процедур. Процедура поєднання двох стратегій поведінки модифікується наступним чином:

$$x_{i+1}^k = x_i^k \alpha + 1 - \alpha x_{best}^k M_i^k. \quad (21)$$

де x_{i+1}^k – нова позиція кандидата на рішення x_i^k . Коефіцієнт масштабування α в даному дослідженні встановлюється 0.1, x_{best}^k – найкраще рішення для ітерації

k ; M_i^k – змінна модуляції кандидата зі зграї агентів. Рівняння (18) визначає об'єднану популяцію агентів зграї комбінованого алгоритму, яка має найкращу продуктивність.

Дія 9.1 Модуляція метаевристичних операторів.

У даному дослідженні модуляція впливу, який має кожен метаевристичний оператор, визначається не лише традиційним порівнянням з найкращим рішенням кандидата, але й аналізом його елітної поведінки. Це змагання починається з визначення рішення x_c^k фактично отриманому рішення x_i^k . Отримання x_c^k має тільки одне обмеження, x_c^k має бути відмінним від x_i^k .

Дія 9.2 Парне змагання груп агентів в комбінованому алгоритмі.

Процедура змагання груп індивідів в комбінованому алгоритмі описується рівням (22):

$$\begin{aligned} \text{якщо } f(x_i^k) < f(x_c^k) \text{ тоді } x_i^k = x_c^k \text{ та } M_i^k \\ \text{якщо } (x_i^k) > f(x_c^k) \text{ та } Pr > r \text{ тоді } x_i^k = G(x_c^k) \text{ та } M_i^k = M_c^k. \end{aligned} \quad (22)$$

Крім того, ймовірнісний поріг визначається різницею в продуктивності отриманого рішення та найкращим рішенням, що змінюється протягом повторень. Цей ймовірнісний поріг визначається наступним рівнянням:

$$Pr = \left| \frac{f(x_i^k) - f(x_c^k)}{BF} \right|, \quad (23)$$

де Pr – ймовірнісний поріг, x_i^k – фактичне рішення, x_c^k – еталонне рішення, а BF – вартість отриманого рішення. Нова позиція x_i^k встановлюється, розглядаючи евклідову відстань між x_i^k і x_c^k . Позиція оновлюється за допомогою рівняння (24):

$$r \cdot dist - x_c^k, \quad (24)$$

де r – це випадкове число, що зазвичай розподілене, а $dist$ – евклідова відстань між x_i^k та x_c^k . Варто зазначити, що зазначена процедура сприяє дослідженню нових ділянок пошуку простору рішення x_i^k . Ця процедура

запобігає передчасній конвергенції і забезпечує аналіз обчислювальних можливостей алгоритму.

Дія 10. Перевірка критерію зупинки агентів зграї комбінованого алгоритму.

Алгоритм завершується, якщо виконано максимальну кількість ітерацій. В іншому випадку генерація нових місць і перевірка умов повторюється.

Дія 11. Навчання баз знань агентів зграї комбінованого алгоритму.

В зазначеному дослідженні для навчання баз знань кожного агента зграї комбінованого алгоритму використовується розроблений у дослідженні [209] метод навчання на основі штучних нейронних мереж, що еволюціонують. Метод використовується для зміни характеру пересування кожного агента зграї комбінованого алгоритму, для більш точних результатів аналізу в подальшому.

Дія 12. Визначення кількості необхідних обчислювальних ресурсів, інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

З метою недопущення зациклювання обчислювань на діях 1–11 даного методу, та підвищення оперативності обчислювань додатково визначається завантаженість системи. При перевищенні визначеного порогу обчислювальної складності визначається кількість програмно-апаратних ресурсів які необхідно додатково залучити, за допомогою методу, запропонованого в роботі [230].

Кінець алгоритму.

Ефективність метод обробки гетерогенних даних в організаційно-технічних системах порівнюється за допомогою функцій – вигляд яких наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Оцінка ефективності запропонованого методу обробки гетерогенних даних за критерієм оперативності обробки інформації

Назва функції	Метрика	Канонічний алгоритм рою частинок	Алгоритм мурашиної колонії	Алгоритм чорної вдови	Алгоритм зграї сірих вовків	Алгоритм зграї гепардів	Запропонований метод
U22-1	Середнє значення	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000
	Стандартне значення	2.17547E-07	1.94448E-07	1.73866E-07	1.73121E-07	1.51021E-07	1.72168E-07
B22-2	Середнє значення	400	400.265772	400.7973158	400.265772	400.3986579	400.5315439

Продовження таблиці 3

	Стандартне значення	4.9898E-08	1.011427534	1.621892282	1.011427535	1.21641921 2	1.378343398
B22-3	Середнє значення	600.0071815	600.0644622	600.0240021	600.012832	600.031303	600.0449987
	Стандартне значення	0.021632777	0.184980091	0.115606243	0.053463097	0.14701151 3	0.101164243
B22-4	Середнє значення	826.5653461	827.3281442	823.8789639	826.3000191	826.266848 6	825.7693662
	Стандартне значення	9.13817552	8.364210734	11.30806963	8.186625055	9.13610732 3	10.05991317
B22-5	Середнє значення	900.743876	900.9504411	900.9726169	900.8007883	900.545204 2	901.2016312
	Стандартне значення	0.781626306	1.424558753	1.275779755	0.903385622	0.63578192 4	1.598982565
B22-6	Середнє значення	1888.524629	1874.869967	1876.294359	1847.184924	1888.92695 3	1842.878175
	Стандартне значення	127.2561383	91.22185049	69.00003268	32.76980351	140.693674	31.32108747
H22-7	Середнє значення	2027.479588	2030.758499	2029.556604	2032.238674	2028.17797 8	2029.128603
	Стандартне значення	6.106897592	8.027195324	5.81348717	7.446489204	8.00396844 6	8.197733191
H22-8	Середнє значення	2223.108804	2223.537417	2222.070633	2223.140251	2220.88847 5	2220.690533
	Стандартне значення	4.749655105	2.963408213	4.895282849	3.995669404	5.45165400 6	6.337353983
H22-9	Середнє значення	2510.930321	2510.930321	2536.358938	2498.216012	2523.64462 9	2498.216012
	Стандартне значення	65.93880108	65.93880108	85.778947	48.38585173	77.5899769 4	48.38585173
C22-10	Середнє значення	2594.615905	2596.833927	2585.256107	2591.210109	2605.30419 4	2619.308989
	Стандартне значення	48.2013289	49.71807546	57.1034079	56.36586785	42.5739519 9	34.10382553
C22-11	Середнє значення	2695.981932	2685.587394	2733.855734	2710.621315	2700.16841 3	2715.332781
	Стандартне значення	116.3652035	110.1475838	146.333679	118.5098748	113.791384 9	109.3008673
C22-12	Середнє значення	2857.067086	2858.742176	2854.959949	2861.414681	2859.40778 8	2860.718769
	Стандартне значення	9.364347909	14.88960231	5.539104327	17.96133754	15.0054516 3	16.34731781

В таблиці 4 наведено результати оцінки достовірності прийнятих рішень для кожного з методів оптимізації рішень для обробки гетерогенних даних в організаційно-технічних системах.

Таблиця 4

Оцінка ефективності запропонованого методу управління за критерієм
достовірності обробки інформації

Назва функції	Метрика	Канонічний алгоритм рою частинок	Алгоритм мурашиної колонії	Алгоритм чорної вдови	Алгоритм зграї сірих вовків	Алгоритм зграї гепардів	Запропонований метод
U22-1	Середнє значення	0,66	0,73	0,67	0,68	0,8	0,9
	Стандартне значення	0,7	0,73	0,68	0,69	0,83	0,91
B22-2	Середнє значення	0,7	0,73	0,7	0,71	0,77	0,89
	Стандартне значення	0,71	0,73	0,72	0,72	0,76	0,9
B22-3	Середнє значення	0,68	0,73	0,7	0,71	0,76	0,92
	Стандартне значення	0,69	0,73	0,69	0,73	0,77	0,91
B22-4	Середнє значення	0,67	0,74	0,7	0,72	0,78	0,93
	Стандартне значення	0,67	0,72	0,67	0,72	0,79	0,92
B22-5	Середнє значення	0,6	0,71	0,64	0,73	0,8	0,91
	Стандартне значення	0,61	0,72	0,64	0,74	0,88	0,92
B22-6	Середнє значення	0,64	0,73	0,66	0,77	0,85	0,93
	Стандартне значення	0,66	0,75	0,66	0,78	0,83	0,92
H22-7	Середнє значення	0,67	0,72	0,68	0,75	0,81	0,9
	Стандартне значення	0,68	0,71	0,69	0,74	0,83	0,9
H22-8	Середнє значення	0,68	0,74	0,69	0,75	0,84	0,93
	Стандартне значення	0,65	0,74	0,67	0,77	0,81	0,91
H22-9	Середнє значення	0,64	0,75	0,66	0,69	0,83	0,91
	Стандартне значення	0,7	0,72	0,71	0,71	0,84	0,93
C22-10	Середнє значення	0,69	0,71	0,7	0,72	0,8	0,94

Продовження таблиці 4

	Стандарт не значення	0,68	0,71	0,7	0,73	0,8	0,91
C22-11	Середнє значення	0,67	0,71	0,69	0,71	0,82	0,91
	Стандарт не значення	0,67	0,72	0,68	0,74	0,91	0,91
C22-12	Середнє значення	0,63	0,73	0,65	0,75	0,82	0,91
	Стандарт не значення	0,62	0,74	0,66	0,76	0,83	0,91

З аналізу табл. 3, 4 можна зробити висновки, що запропонований метод забезпечує стабільну роботу алгоритму для основних тестових функцій унімодального та мультимодального виду.

Як видно з табл. 3, 4 підвищення оперативності прийняття рішень досягається на рівня 14–20 % за рахунок використання додаткових процедур та забезпечення достовірності прийнятих рішень на рівні 0.9.

Запропонований підхід доцільно використовувати для вирішення завдання обробки гетерогенних даних, що характеризуються високим ступенем складності.

5.5.3 Метод оцінки завадозахищеності систем радіозв'язку спеціального призначення з використанням штучного інтелекту

Метод оцінки завадозахищеності систем радіозв'язку спеціального призначення (СРЗ) з використанням теорії штучного інтелекту складається з наступної послідовності дій:

Дія 1. Введення вихідних даних. На даному етапі вводяться вихідні дані, що наявні про систему СРЗ спеціального призначення, а також засоби РЕП противника, а саме: кількість та тип засобів радіозв'язку, які входять до її складу; кількість та тип засобів РЕП противника; технічні характеристики ЗРЗ; технічні характеристики засобів РЕП; архітектура (топологія зв'язків) СРЗ; архітектура (топологія зв'язків) засобів РЕП; тип даних, що циркулюють в

ній; наявні обчислювальні ресурси; інформація про середовище застосування та ін.

Дія 2. Ініціалізація та формування загальної популяції агентів зграї комбінованого алгоритму.

На даному етапі генеруються початкові випадкові набори рішень, що представляють групи агентів комбінованого алгоритму.

Математичне представлення випадково вибраної групи агентів комбінованого алгоритму з сукупності можливих агентів у межах їх певної території математично описується наступним чином:

$$P_{i,j} = P_{i,j}^{\min} + \left(\lambda \left(P_{i,j}^{\max} - P_{i,j}^{\min} \right) \right) \gamma, \quad (25)$$

де λ – випадкове число в діапазоні від 0 до 1, $P_{i,j}$ – i -те позначення j -ї групи агентів комбінованого алгоритму. Здійснюється розміщення сукупності агентів комбінованого алгоритму в порядку зростання значень $f(P_i)$, обрання найкращого (P_i^{best}) та найгіршого рішення (P_i^{worst}), γ – ступінь невизначеності даних про засоби РЕП противника. Також на даному етапі визначається цільова функція завадозахищеності $f(P)$, розмір популяції (m) зграї комбінованого алгоритму, встановлюється кількість змінних (n), обмеження на значення змінних (LB, UB) і критерій завершення роботи алгоритму ($FE_{\max}$).

Дія 3. Нумерація агентів комбінованого алгоритму в популяції, $i, i \in [0, S]$.

На даному етапі кожному агенту зграї комбінованого алгоритму в популяції присвоюється порядковий номер.

Дія 4. Визначення початкової швидкості агентів комбінованого алгоритму в популяції.

Початкова швидкість v_0 кожного агента в популяції визначається наступним виразом:

$$v_i = (v_1, v_2, \dots, v_S), \quad v_i = v_0. \quad (26)$$

Дія 5. Попереднє оцінювання ділянки пошуку агентами зграї комбінованого алгоритму. В даній процедурі ділянка пошуку на природній мові визначається саме ореолом для кожної з груп зграї комбінованого алгоритму.

Дія 6. Класифікація джерел їжі для агентів зграї комбінованого алгоритму.

Місцезнаходження найкращого джерела їжі (тобто мінімальна придатність) вважається (FS_{ht}) їжа, яка знаходиться поряд та вимагає найменшої витрати енергії для її пошуку та здобування. Делікатесна їжа, яка вимагає найбільших затрат на її добування позначимо як FS_{at} .

Інші не пріоритетні джерела харчування (їжа, яка необхідна для виживання особин) позначимо як FS_{nt} :

$$FS_{ht}=FS(sort\_index(1)), \quad (27)$$

$$FS_{at}(1:4)=FS(sort\_index(1:3)), \quad (28)$$

$$FS_{nt}(1:NP-4)=FS(sort\_index(6: NP)). \quad (29)$$

Дія 7. Виконання обчислень окремими групами зі зграї комбінованого алгоритму.

Дія 7.1 Виконання обчислень агентами зі зграї гнойових жуків.

Даний алгоритм імітує певну поведінку гнойових жуків у природі, а алгоритм гнойових жуків (АГЖ) ділить всю популяцію на чотири відповідні сегменти на основі цієї поведінки.

Дія 7.1.1. Процедура катання м'яча.

Коли гнойові жуки котять гнойову кулю, вони повинні переконатися, що їхній шлях є прямолінійним відповідно до положення небесних тіл. Щоб імітувати таку поведінку жука-гнойовика, в алгоритмі особини рухаються в заданому напрямку по всьому простору пошуку. Передбачається, що інтенсивність сонця впливає на шлях окремих жуків-гнойовиків. Цей процес змінює положення людини, як показано в рівнянні (30) нижче:

$$\begin{aligned} X_n^{i+1} &= X_n^i + a \cdot k \cdot X_n^{i-1} + b \cdot \Delta x \\ \Delta x &= |X_n^i - X^\omega| \end{aligned} \quad (30)$$

де X_n^{i+1} – позиція n -го жука-гнойовика на i -й ітерації, $k \in (0, 0.2]$ – коефіцієнт відхилення (якому в коді присвоєно значення 0,1);

$b \in (0, 1)$ – природний коефіцієнт (якому в коді присвоєно значення 0,3);

x – ступінь зміни інтенсивності освітлення, X^o – найгірша позиція агента жука в межах поточної популяції;

a – це природний коефіцієнт, якому присвоєно значення 1 або -1 , таким чином, що $a = 1$ вказує на те, що природне середовище не впливає на вихідний напрямок, тоді як $a = -1$ вказує на відхилення від початкового напрямку. Даний коефіцієнт в дослідженні характеризує ступінь придушення СРЗ засобами РЕП.

У природі, коли жуки-гнойовики стикаються з перешкодою на своєму шляху, вони вирішують повернути своє тіло, щоб змінити напрямок і таким чином обійти перешкоду. В нашому випадку, зазначена процедура описує процес перебудови маршруту передачі інформації при виведенні з ладу елемента СРЗ в результаті впливу дестабілізуючих факторів, та описується:

$$\begin{aligned} X_n^{i+1} &= X_n^i + \tan \alpha |X_n^i - X_n^{i-1}| \\ 0 &\leq \alpha \leq \pi \end{aligned} \quad (31)$$

де α – кут відбиття між новим напрямком жука-гнойовика та його початковим напрямком.

Дія 7.1.2 Процедура розмноження жуків.

Коли куля гною повертається до гнізда, гнойовикам необхідно вибрати відповідне місце для відкладання яєць, щоб забезпечити безпечне середовище для свого потомства. Базуючись на наведеному вище обговоренні, в алгоритмі виявляється стратегія відбору меж для моделювання області, де самки відкладають свої яйця, яка визначається наступним чином (32):

$$\begin{aligned} LB_1 &= \max(X^t \cdot (1-T), LB) \\ UB_1 &= \min(X^t \cdot (1+T), UB), \end{aligned} \quad (32)$$

де X^t – поточний локальний оптимум, LB_1 та UB_1 – нижня і верхня межі області нересту; Lb і Ub – нижня і верхні межі пошукового простору відповідно, а ваги інерції $R = 1 - t/T_{max}$, де T_{max} – максимальна кількість ітерацій під час ітерації алгоритму.

В контексті даного дослідження зазначена процедура визначає елементи СРЗ, які найменш придушені.

Граничний діапазон області відкладки яєць змінюється динамічно, що запобігає потраплянню алгоритму в локальний оптимум. Отже, у процесі ітерації положення куль штрихування також може змінюватися, процес можна описати таким чином:

$$X_n^{i+1} = X^t + B_1 \cdot (X_n^i - LB_1) + B_2 \cdot (X_n^i - UB_1), \quad (33)$$

де X_n^i – позиція n -ї гнійної кульки для виведення на t -й ітерації, B_1 і B_2 – дві незалежні випадкові матриці, D – розмірність алгоритму.

Дія 7.1.3 Вилуплення гнойових жуків.

Коли молоді жуки-гнойовики успішно вилуплюються, вони вибігають групами, щоб знайти їжу, процес пошуку їжі також передбачає обмеження діапазону. Для цих маленьких жуків-гнойовиків оптимальна територія нагулу визначається таким чином:

$$\begin{aligned} LB_2 &= \max(X^{tb} \cdot (1-T), LB) \\ UB_2 &= \min(X^{tb} \cdot (1-T), UB), \end{aligned} \quad (34)$$

де X^{tb} – глобальний оптимум, а LB_2 та UB_2 – нижня та верхня межі площі відповідно. Після визначення місця положення малого гнойового жука можна оновити наступним чином (35):

$$X_i^{n+1} = X_i^n + C_1 \cdot (X_i^n - LB_2) + C_2 \cdot (X_i^n - UB_2), \quad (35)$$

де X_i^{n+1} – інформація про місцезнаходження i -го маленького жука-гнойовика на t -й ітерації, C_1 – випадкове число, яке описується розподілом Гауса; C_2 – набір, що належить до інтервалу $(0, 1)$.

Дія 7.1.4 Виконання стратегія крадників.

У популяціях гнойових жуків одні гнойові жуки крадуть гнойові кульки в інших, цих жуків-гнойовиків називають злодіями. Як зазначено вище, X^s – це глобальне оптимальне положення, тобто найкраще місце для їжі. Отже, можна припустити, що околиці X – є найкращим місцем для конкуренції за їжу. Розташування жуків-злодіїв-гнойовиків оновлюється протягом процесу ітерації наступним чином (36):

$$X_n^{i+1} = X^s + P \cdot d \cdot (|X_n^i - X^t| + |X_n^i - X^-|), \quad (36)$$

де d – випадковий вектор розміром $1:D$, що відповідає нормальному розподілу, P – константа.

Дія 7.2 Виконання обчислень агентами зі зграї скоп.

Дія 7.2.1 Глобальна експлуатація

Для створення моделі для першого етапу оновлення популяції агентів скоп була змодельована природна поведінка орланів. Рівняння (37) використовується для визначення розташування кожної скопи:

$$OS_n = \{X_t \mid t \in \{1, 2, \dots, N\} \wedge O_t < O_n\} \cup \{X^*\}, \quad (37)$$

де OS_n – сукупність місць, зайнятих n -ою скопою, а X^* – точне розташування оптимальної скопи. Скопа самостійно визначає місцезнаходження однієї з риби і починає на неї напад. Розрахунок нового положення скопи відносно риби визначається на основі моделювання руху скопи, як описано в рівнянні (38). Якщо цільова функція має краще значення, нова позиція витіснить попередню позицію скопи:

$$\begin{aligned} x_{i,j}^{P1} &= xi, j + ri, j \cdot (SF_{i,j} - I_{i,j} \cdot x_{i,j}), \\ x_{i,j}^{P1} &= \begin{cases} x_{i,j}^{P1}, lb_j \leq x_{i,j}^{P1} \leq ub_j; \\ lb_j, x_{i,j}^{P1} \langle lb_j; \\ ub_j, x_{i,j}^{P1} \rangle ub_j. \end{cases} \\ X_i &= \begin{cases} X_i^{P1}, F_i^{P1} \langle F_i; \\ X_i, такеж, \end{cases} \end{aligned} \quad (38)$$

де $x_{i,j}^{P1}$ – нова позиція j -го виміру i -тої скопи на першому етапі, а $F_{i,j}$ – відповідне значення придатності положення скопи, $SF_{i,j}$ – випадкове число між $[207, 208]$ та $I_{i,j}$ – випадкове число в наборі 1, 2.

Дія 7.2.2 Місцева експлуатація.

Коли скопа ловить рибу, вона транспортує її в безпечну зону і там споживає. Другий етап оновлення популяції передбачає використання методів імітаційного моделювання для відтворення природної поведінки скопи. Процес спрямування риби до відповідного місця призводить до невеликих коригувань положення скопи в просторі пошуку. Це, у свою чергу, підвищує здатність процедури використовувати локальний пошук і переходити до більш оптимального рішення

в безпосередній близькості від визначеного рішення. Це положення вважається «придатним для споживання риби» і визначається за допомогою наступного рівняння (39). Згодом, у випадку, якщо значення цільової функції демонструє посилення у вищезгаданій позиції, попередня позиція пов'язаного нащадка замінюється:

$$\begin{aligned}
 x_{i,j}^{P2} &= x_{i,j} + \frac{lb_j + r \cdot (ub_j - lb_j)}{t}, \\
 i &= 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, m, t = 1, 2, \dots, T, \\
 x_{i,j}^{P2} &= \begin{cases} x_{i,j}^{P2}, lb_j \leq x_{i,j}^{P2} \leq ub_j; \\ lb_j, x_{i,j}^{P2} < lb_j; \\ ub_j, x_{i,j}^{P2} > ub_j. \end{cases} \\
 X_i &= \begin{cases} X_i^{P2}, F_i^{P2} < F_i; \\ X_i, \text{також}, \end{cases}
 \end{aligned} \tag{40}$$

де $x_{i,j}^{P2}$ – нове положення j -го виміру i -ї скопи на другому етапі; F_i^{P2} – відповідне значенням придатності оновленого положення; r – випадкове число між [207, 208] t , T – поточний номер ітерації та максимальний номер ітерації відповідно.

Дія 8. Поєднання стратегій пошуку двох алгоритмів.

Після створення початкової популяції кожен агент отримує розмір популяції, який становить половину від початкової популяції, як це визначено в розглянутій роботі. Процес застосування метаевристичних операторів спрощується шляхом послідовного застосування поведінки алгоритму зграї скоп та алгоритму зграї гнойових жуків, відповідно до їхніх процедур. Процедура поєднання двох стратегій поведінки модифікується наступним чином:

$$x_{i+1}^k = x_i^k \alpha + 1 - \alpha x_{best}^k M_i^k. \tag{41}$$

де x_{i+1}^k – нова позиція кандидата на рішення x_i^k . Коефіцієнт масштабування α в даному дослідженні встановлюється 0.1, x_{best}^k – найкраще рішення для ітерації k ; M_i^k – змінна модуляції кандидата зі зграї агентів. Рівняння (41) визначає об'єднану популяцію агентів зграї комбінованого алгоритму, яка має найкращу продуктивність.

Дія 8.1 Модуляція метаверистичних операторів.

У даному дослідженні модуляція впливу, який має кожен метаверистичний оператор, визначається не лише традиційним порівнянням з найкращим рішенням кандидата, але й аналізом його елітної поведінки. Це змагання починається з визначення рішення x_c^k фактично отриманому рішення x_i^k . Отримання x_c^k має тільки одне обмеження, x_c^k має бути відмінним від x_i^k .

Дія 8.2 Парне змагання груп агентів в комбінованому алгоритмі.

Процедура змагання груп індивідів в комбінованому алгоритмі описується рівням (42):

$$\begin{aligned} \text{якщо } f(x_i^k) < f(x_c^k) \text{ тоді } x_i^k &= x_c^k \text{ та } M_i^k \\ \text{якщо } (x_i^k) > f(x_c^k) \text{ та } Pr > r \text{ тоді } x_i^k &= G(x_c^k) \text{ та } M_i^k = M_c^k. \end{aligned} \quad (42)$$

Крім того, ймовірнісний поріг визначається різницею в продуктивності отриманого рішення та найкращим рішенням, що змінюється протягом повторень. Цей ймовірнісний поріг визначається наступним рівнянням:

$$Pr = \left| \frac{f(x_i^k) - f(x_c^k)}{BF} \right|, \quad (43)$$

де Pr – ймовірнісний поріг, x_i^k – фактичне рішення, x_c^k – еталонне рішення, а BF – вартість отриманого рішення. Нова позиція x_i^k встановлюється, розглядаючи евклідову відстань між x_i^k і x_c^k . Позиція оновлюється за допомогою рівняння (44):

$$r \cdot dist - x_c^k, \quad (44)$$

де r – це випадкове число, що зазвичай розподілене, а $dist$ – евклідова відстань між x_i^k та x_c^k . Варто зазначити, що зазначена процедура сприяє дослідженню нових ділянок пошуку простору рішення x_i^k . Ця процедура запобігає передчасній конвергенції і забезпечує аналіз обчислювальних можливостей алгоритму.

Дія 9. Перевірка критерію зупинки агентів зграї комбінованого алгоритму.

Алгоритм завершується, якщо виконано максимальну кількість ітерацій. В

іншому випадку генерація нових місць і перевірка умов повторюється.

Дія 10. Навчання баз знань агентів зграї комбінованого алгоритму.

В зазначеному дослідженні для навчання баз знань кожного агента зграї комбінованого алгоритму використовується розроблений у дослідженні [209] метод навчання на основі штучних нейронних мереж, що еволюціонують. Метод використовується для зміни характеру пересування кожного агента зграї комбінованого алгоритму, для більш точних результатів аналізу в подальшому.

Дія 11. Визначення кількості необхідних обчислювальних ресурсів, інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

З метою недопущення зациклювання обчислювань на діях 1–10 даного методу, та підвищення оперативності обчислювань додатково визначається завантаженість системи. При перевищенні визначеного порогу обчислювальної складності визначається кількість програмно-апаратних ресурсів які необхідно додатково залучити, за допомогою методу, запропонованого в роботі [230].

Ефективність метод обробки гетерогенних даних в організаційно-технічних системах порівнюється за допомогою функцій – вигляд яких наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Оцінка ефективності запропонованого методу обробки гетерогенних даних за критерієм оперативності обробки інформації

Назва функції	Метрика	Канонічний алгоритм рою частинок	Алгоритм мурашиної колонії	Алгоритм чорної вдови	Алгоритм зграї сірих вовків	Алгоритм зграї гепардів	Запропонований метод
U22-1	Середнє значення	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000
	Стандартне значення	2.17547E-07	1.94448E-07	1.73866E-07	1.73121E-07	1.51021E-07	1.72168E-07
B22-2	Середнє значення	400	400.265772	400.7973158	400.265772	400.3986579	400.5315439
	Стандартне значення	4.9898E-08	1.011427534	1.621892282	1.011427535	1.216419212	1.378343398
B22-3	Середнє значення	600.0071815	600.0644622	600.0240021	600.012832	600.031303	600.0449987

Продовження таблиці 5

	Стандартне значення	0.021632777	0.184980091	0.115606243	0.053463097	0.147011513	0.101164243
B22-4	Середнє значення	826.5653461	827.3281442	823.8789639	826.3000191	826.2668486	825.7693662
	Стандартне значення	9.13817552	8.364210734	11.30806963	8.186625055	9.136107323	10.05991317
B22-5	Середнє значення	900.743876	900.9504411	900.9726169	900.8007883	900.5452042	901.2016312
	Стандартне значення	0.781626306	1.424558753	1.275779755	0.903385622	0.635781924	1.598982565
B22-6	Середнє значення	1888.524629	1874.869967	1876.294359	1847.184924	1888.926953	1842.878175
	Стандартне значення	127.2561383	91.22185049	69.00003268	32.76980351	140.693674	31.32108747
H22-7	Середнє значення	2027.479588	2030.758499	2029.556604	2032.238674	2028.177978	2029.128603
	Стандартне значення	6.106897592	8.027195324	5.81348717	7.446489204	8.003968446	8.197733191
H22-8	Середнє значення	2223.108804	2223.537417	2222.070633	2223.140251	2220.888475	2220.690533
	Стандартне значення	4.749655105	2.963408213	4.895282849	3.995669404	5.451654006	6.337353983
H22-9	Середнє значення	2510.930321	2510.930321	2536.358938	2498.216012	2523.644629	2498.216012
	Стандартне значення	65.93880108	65.93880108	85.778947	48.38585173	77.58997694	48.38585173
C22-10	Середнє значення	2594.615905	2596.833927	2585.256107	2591.210109	2605.304194	2619.308989
	Стандартне значення	48.2013289	49.71807546	57.1034079	56.36586785	42.57395199	34.10382553
C22-11	Середнє значення	2695.981932	2685.587394	2733.855734	2710.621315	2700.168413	2715.332781
	Стандартне значення	116.3652035	110.1475838	146.333679	118.5098748	113.7913849	109.3008673
C22-12	Середнє значення	2857.067086	2858.742176	2854.959949	2861.414681	2859.407788	2860.718769
	Стандартне значення	9.364347909	14.88960231	5.539104327	17.96133754	15.00545163	16.34731781

В таблиці 6 наведено результати оцінки достовірності прийнятих рішень для кожного з методів оптимізації рішень для обробки гетерогенних даних в організаційно-технічних системах.

Таблиця 6

Оцінка ефективності запропонованого методу управління за критерієм достовірності обробки інформації

Назва функції	Метрика	Канонічний алгоритм рою частинок	Алгоритм мурашиної колонії	Алгоритм чорної вдови	Алгоритм зграї сірих вовків	Алгоритм зграї гепардів	Запропонований метод
U22-1	Середнє значення	0,66	0,73	0,67	0,68	0,8	0,9
	Стандартне значення	0,7	0,73	0,68	0,69	0,83	0,91
B22-2	Середнє значення	0,7	0,73	0,7	0,71	0,77	0,89
	Стандартне значення	0,71	0,73	0,72	0,72	0,76	0,9
B22-3	Середнє значення	0,68	0,73	0,7	0,71	0,76	0,92
	Стандартне значення	0,69	0,73	0,69	0,73	0,77	0,91
B22-4	Середнє значення	0,67	0,74	0,7	0,72	0,78	0,93
	Стандартне значення	0,67	0,72	0,67	0,72	0,79	0,92
B22-5	Середнє значення	0,6	0,71	0,64	0,73	0,8	0,91
	Стандартне значення	0,61	0,72	0,64	0,74	0,88	0,92
B22-6	Середнє значення	0,64	0,73	0,66	0,77	0,85	0,93
	Стандартне значення	0,66	0,75	0,66	0,78	0,83	0,92
H22-7	Середнє значення	0,67	0,72	0,68	0,75	0,81	0,9
	Стандартне значення	0,68	0,71	0,69	0,74	0,83	0,9
H22-8	Середнє значення	0,68	0,74	0,69	0,75	0,84	0,93
	Стандартне значення	0,65	0,74	0,67	0,77	0,81	0,91
H22-9	Середнє значення	0,64	0,75	0,66	0,69	0,83	0,91
	Стандартне значення	0,7	0,72	0,71	0,71	0,84	0,93
C22-10	Середнє значення	0,69	0,71	0,7	0,72	0,8	0,94
	Стандартне значення	0,68	0,71	0,7	0,73	0,8	0,91
C22-11	Середнє значення	0,67	0,71	0,69	0,71	0,82	0,91
	Стандартне значення	0,67	0,72	0,68	0,74	0,91	0,91
C22-12	Середнє значення	0,63	0,73	0,65	0,75	0,82	0,91
	Стандартне значення	0,62	0,74	0,66	0,76	0,83	0,91

З аналізу табл. 5, 6 можна зробити висновки, що запропонований метод забезпечує стабільну роботу алгоритму для основних тестових функцій унімодального та мультимодального виду.

Як видно з табл. 5, 6 підвищення оперативності прийняття рішень досягається на рівня 14–20 % за рахунок використання додаткових процедур та забезпечення достовірності прийнятих рішень на рівні 0.9.

Запропонований підхід доцільно використовувати для вирішення завдання обробки гетерогенних даних, що характеризуються високим ступенем складності.

Висновки

1. Визначено алгоритм реалізації методу, завдяки додатковим та удосконаленим процедурам що дозволяє:

- початкова популяція АБВ та їх вихідне положення на площині пошуку визначається з врахуванням ступеню невизначеності вихідних даних про маршрут руху групи БпЛА;

- враховується початкова швидкість кожного АБВ, чим досягається можливість визначати пріоритетність пошуку у відповідній площині пошуку (по висоті, широті та довготі);

- визначається придатність маршруту польоту групи БпЛА при виконанні польотного завдання з урахуванням сукупності зовнішніх факторів, чим зменшується час пошуку рішення;

- універсальність стратегій пошуку місць харчування АБВ, чим дозволяється класифікувати сукупність умов та факторів, які впливають на виконання польотного завдання. Це дозволяє визначити найбільш придатні варіанти руху групи БпЛА по визначеному критерію оптимізації маршруту руху;

- можливістю досліджувати простори рішення функцій, що описуються нетиповими функціями, за рахунок використання процедур вибору техніки ходи АБВ;

- проводити заміну непридатних для пошуку осіб за рахунок оновлення

популяції АБВ;

- можливість одночасного пошуку рішення в різних напрямках;
- можливістю глибокого навчання баз знань АБВ;
- можливістю розрахунку необхідної кількості обчислювальних ресурсів, яких необхідно залучити у разі неможливості проведення розрахунків наявними обчислювальними ресурсами.

2. Проведений приклад використання запропонованого методу на прикладі побудови маршруту руху групи БпЛА, який показав підвищення оперативності прийняття рішень досягається на рівня 15–18 % за рахунок використання додаткових процедур та забезпечення достовірності прийнятих рішень на рівні 0.9.

3. Визначено алгоритм реалізації методу, завдяки додатковим та удосконаленим процедурам що дозволяє:

досягти виставлення початкової популяції агентів зграї комбінованого алгоритму та їх вихідне положення на площині пошуку з врахуванням ступеню невизначеності вихідних даних про інформацію, яка циркулює в організаційно-технічній системі за рахунок використання відповідних корегувальних коефіцієнтів. Зазначене дозволяє скоротити час на початкове налаштування підсистеми обробки гетерогенних даних при первинному налаштуванні;

враховувати початкову швидкість кожного з агентів зграї комбінованого алгоритму, чим досягається можливість визначати пріоритетність пошуку у відповідній площині пошуку (по елементам і складовим частинам організаційно-технічної системи);

визначається придатність прийнятих рішень при обробці гетерогенних даних з урахуванням сукупності зовнішніх факторів, чим зменшується час пошуку рішення ;

класифікувати сукупність умов та факторів, які впливають на процес обробки гетерогенних даних за рахунок універсальності стратегій пошуку місць харчування агентів зграї комбінованого алгоритму. Це дозволяє визначити найбільш придатні варіанти рішення щодо обробки гетерогенних даних по

визначеному критерію оптимізації;

досліджувати простори рішення функцій, що описуються нетиповими функціями, за рахунок використання процедури вибору довжини кроку агентів гепардів зі зграї агентів комбінованого алгоритму;

проводити заміну непридатних для пошуку осіб за рахунок оновлення популяції агентів зграї комбінованого алгоритму;

провести порівняльну оцінку ефективності обробки гетерогенних даних за допомогою процедури модуляції метаевристичних операторів ;

можливістю одночасного пошуку рішення в різних напрямках;

можливістю глибокого навчання баз знань агентів зграї комбінованого алгоритму;

можливістю розрахунку необхідної кількості обчислювальних ресурсів, яких необхідно залучити у разі неможливості проведення розрахунків наявними обчислювальними ресурсами.

4. Проведений приклад використання запропонованого методу на прикладі обробки гетерогенних даних в оперативному угрупованні військ (сил), який показав підвищення оперативності прийняття рішень на рівні 14–20 % за рахунок використання додаткових процедур та забезпечення достовірності прийнятих рішень на рівні 0.9.

5. Визначено алгоритм реалізації методу, завдяки додатковим та удосконаленим процедурам що дозволяє:

досягти виставлення початкової популяції агентів зграї комбінованого алгоритму та їх вихідне положення на площині пошуку з врахуванням ступеню невизначеності вихідних даних про інформацію, яка циркулює в організаційно-технічній системі за рахунок використання відповідних корегувальних коефіцієнтів. Зазначене дозволяє скоротити час на початкове налаштування підсистеми обробки гетерогенних даних при первинному налаштуванні;

враховувати початкову швидкість кожного з агентів зграї комбінованого алгоритму, чим досягається можливість визначати пріоритетність пошуку у відповідній площині пошуку (по елементам і складовим частинам організаційно-

технічної системи);

визначається придатність прийнятих рішень при обробці гетерогенних даних з урахуванням сукупності зовнішніх факторів, чим зменшується час пошуку рішення ;

класифікувати сукупність умов та факторів, які впливають на процес обробки гетерогенних даних за рахунок універсальності стратегій пошуку місць харчування агентів зграї комбінованого алгоритму. Це дозволяє визначити найбільш придатні варіанти рішення щодо обробки гетерогенних даних по визначеному критерію оптимізації;

досліджувати простори рішення функцій, що описуються нетиповими функціями, за рахунок використання процедури вибору довжини кроку агентів гепардів зі зграї агентів комбінованого алгоритму;

проводити заміну непридатних для пошуку осіб за рахунок оновлення популяції агентів зграї комбінованого алгоритму;

провести порівняльну оцінку ефективності обробки гетерогенних даних за допомогою процедури модуляції метаввристичних операторів ;

можливістю одночасного пошуку рішення в різних напрямках;

можливістю глибокого навчання баз знань агентів зграї комбінованого алгоритму;

можливістю розрахунку необхідної кількості обчислювальних ресурсів, яких необхідно залучити у разі неможливості проведення розрахунків наявними обчислювальними ресурсами.

6. Проведений приклад використання запропонованого методу на прикладі обробки гетерогенних даних в оперативному угрупованні військ (сил), який показав підвищення оперативності прийняття рішень на рівні 14–20 % за рахунок використання додаткових процедур та забезпечення достовірності прийнятих рішень на рівні 0.9.

5.6 Автоматизація розкладу занять як необхідна умова оптимізації функціонування закладу освіти

Об'єктивний розвиток інформатизації суспільства неминуче сприяє впровадженню нових форм управління навчальним процесом у закладах освіти, зокрема у формуванні розкладу занять. Практика складання розкладу вручну значною мірою відійшла у минуле для більшості освітніх закладів. Очевидно, що традиційне ручне формування розкладу є трудомістким процесом, схильним до людських помилок і конфліктів. З огляду на це, автоматизація процесу складання розкладу є критично важливою для оптимізації функціонування закладів освіти. Автоматизація розкладу у освітніх закладах має безліч переваг, які спрямовані на оптимізацію навчального процесу, зменшення адміністративного навантаження та покращення досвіду всіх учасників освітнього процесу (рис.1).



Рисунок 1. Переваги автоматизації розкладу занять в закладах освіти

Процес формування розкладу навчального процесу у закладах освіти є багатофакторною оптимізаційною задачею [283]. Вона передбачає ефективне розміщення різних академічних сесій у визначений інтервал часу та з одночасним задоволенням великої кількості жорстких та м'яких обмежень. Ці обмеження охоплюють різноманітні напрями, зокрема, кваліфікацію викладачів, доступність аудиторій, вимоги навчальних програм, а також побажання учасників освітнього процесу та інші аспекти. Тому складання розкладу характеризується високою обчислювальною складністю.

Вибір адекватної математичної моделі та надійного алгоритму є важливим етапом для розробки автоматизованої системи складання розкладу. За допомогою математичної моделі здійснюється формалізація усіх суттєвих параметрів формування розкладу, а саме – це викладачі, студенти, аудиторії, дисципліни, їхні властивості та взаємозв'язки між ними. Також потрібно визначити цільову функцію та систему обмежень. Розробка алгоритму, який відповідає цій математичній моделі, є ключовим елементом, бо завдяки йому здійснюється пошук оптимального розв'язку.

Існує кілька технік або підходів для автоматизованого вирішення проблеми формування розкладу у закладах освіти. Розглянемо їх більш детально.

1. Метод імітації відпалу

Даний метод було запропоновано у сфері фізичних процесів кристалізації речовини для покращення однорідності металу. Відпал металу – це імітація пошуку оптимального стану кристалічної решітки з мінімальною енергією. Під час нагрівання металу атоми змінюють своє положення, а після повільного охолодження вибирають енергетично вигідніші позиції. Разом з температурою зменшується ймовірність переходу в гірший стан – низькоенергетичний, який є необхідною умовою для уникнення ув'язнення у локальному мінімумі. При цьому потрібно періодично підвищувати температуру. Таким чином знайти той стан кристалічної решітки, що робить метал міцнішим.

Метод імітації відпалу можливо застосувати для розв'язання задачі складання розкладу в закладах освіти [283-286]. При формуванні розкладу

функцією енергії є критеріальна функція, пов'язана із штрафами при конфліктній ситуації в розкладі, а низькоенергетичний стан – коректний розклад [283]. Блок-схема алгоритму імітації відпалу представлено на рис.2.

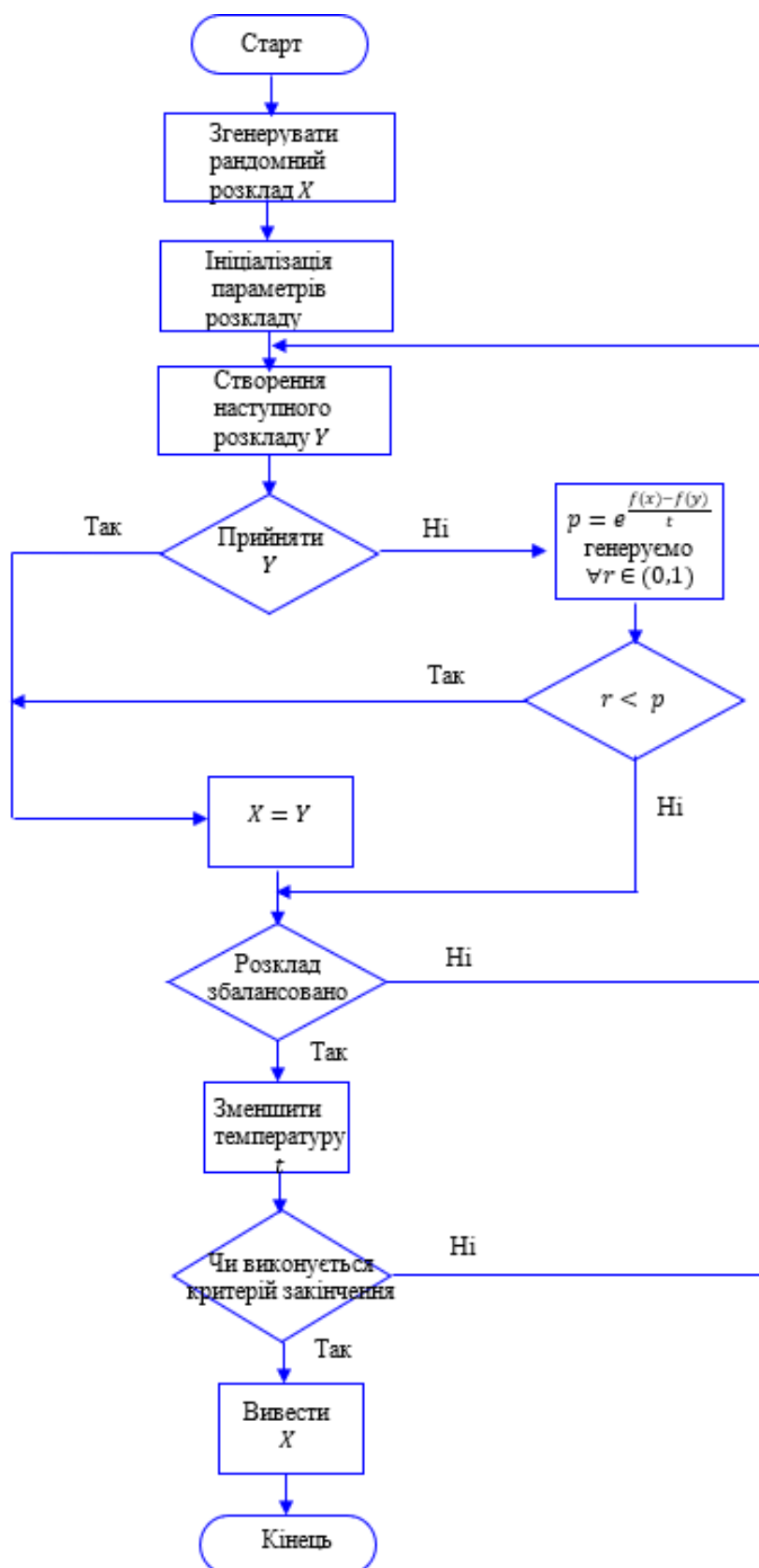


Рисунок 2. Блок-схема моделювання розкладу занять методом відпалу

2. Метод розфарбування графів

Метод розфарбування графів полягає у знаходженні мінімального числа кольорів для розфарбування вершин графа, де сусідні не можуть мати однаковий колір. У процесі формування розкладу в закладах освіти автори досліджень [287-289] пропонують будувати граф, у якого кожна вершина – це навчальне заняття, колір – це часовий слот, ребро – спільні студенти, тобто два заняття (або один викладач) в одній аудиторії, що призводить до конфліктної ситуації при складанні розкладу. Алгоритм має високу складність, тому на практиці найчастіше його застосовують разом з іншими методами.

3. Імітаційне моделювання

За допомогою даного методу здійснюється імітація роботи адміністратора, який створює розклад і намагається задовольнити задані обмеження найкращим чином [283,290]. На першому кроці створюється порожній розклад і задаються усі параметри, да другому – вибирається заняття (за різною логікою) із списку і включають його у розклад, тобто вибирається час і аудиторія, враховуючи усі обмеження. Процес продовжується доти, доки не буде сформовано повний розклад. При цьому, якщо виникають конфліктні ситуації, то дане заняття видаляють з розкладу і вносять у список неврахованих. Значний обсяг ітерацій у даному методі є непривабливим для застосування.

4. Метод програмування з обмеженнями

Формування розкладу в закладах освіти з використанням методу програмування з обмеженням здійснюється за допомогою спеціального програмного забезпечення, у якому декларативно описується задача із змінними: заняття X проводиться у час Y в аудиторії Z , та визначаються обмеження, які можуть вести до конфліктних ситуацій [291-293]. Система автоматично шукає рішення, які задовольняють усім обмеженням. При цьому скорочується процес пошуку не завдяки тестуванню кожного створеного розкладу, а система сама відсіює внаслідок відповідних прописаних правил. Метод програмування з обмеженнями часто застосовують при створенні розкладу для реальних закладів освіти.

5. Алгоритм мурашиної колонії

Даний метод застосовують у різних сферах для вирішення задач оптимізації, зокрема і у формуванні розкладу. Метод мурашиної колонії є ітераційним ймовірнісним алгоритмом, який повністю наслідує поведінку живих мурах у процесі пошуку найкоротшого шляху на зважених графах. Мурахи, шукаючи їжу, рандомно рухаються по стежках. При цьому залишають феромон на даному шляху, значення якого залежить від якості та розміру їжі. Проте він також із часом може випаровуватися. Найсильніший феромон вказує на найкоротший шлях. За допомогою даного методу створюється велике число розкладів, з кожною ітерацією розклади стають ефективнішими, оскільки мурахи "навчаються" від попередніх [294-297].

6. Генетичні алгоритми

В основі генетичних алгоритмів лежить теорія еволюції з такими характеристиками, як спадковість, мінливість, природний вибір. Більшість алгоритмів оптимізації працюють над удосконаленням одного розкладу, генетичні алгоритми фокусуються на популяції рішень, представлених у вигляді хромосом [298-302]. Генетичний алгоритм – ітераційний метод, блок-схема якого представлена на рис.3.

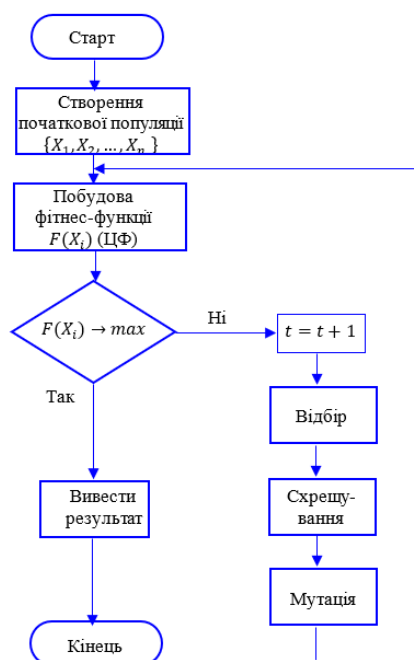


Рисунок 3. Блок-схема моделювання розкладу занять за допомогою генетичного алгоритму

Набір хромосом у формуванні розкладу – це навчальні заняття, які містять інформацію про час, викладачів, аудиторію. Для створення хромосом кодують інформацію за допомогою бінарного кодування. Використання цільової функції (у даному алгоритмі вона називається фітнес-функція) дозволяє перевірити, чи придатна дана хромосома для подальшого використання. У випадку негативного оцінювання хромосоми, її піддають процесам:

- схрещування (кожна хромосома є нащадком двох попередніх популяцій);
- мутації (зміна випадково відібраних генів).

Для формування розкладу схрещування застосовують рідко із-за громіздких обчислень. Після мутації за допомогою фітнес-функції знову оцінюється згенерована хромосома.

Генетичні алгоритми застосовують з іншими методами для більш ефективного створення розкладів.

Досліджені методи є потужним інструментом для формування розкладу в системах освіти. Проте кожний з них має свої переваги та недоліки, які представлені у таблиці 1.

Таблиця 1.
Порівняння методів формування розкладу в закладах освіти

№ з/п	Методи формування розкладу	Переваги	Недоліки
1	Метод імітації відпалу	1) Уникнення локальних мінімумів. 2) Універсальність. 3) Простота реалізації. 4) Ефективність для складних задач.	1) Витрати часу. 2) Залежність від параметрів. 3) Відсутність гарантії абсолютного мінімуму. 4) Ймовірнісний характер результатів.
2	Метод розфарбування графів	1) Візуалізація конфліктів, що дозволяє їх мінімізувати. 2) Простота у використанні і реалізації. 3) Зменшення ресурсів.	1) Складність обчислень (NP-повнота). 2) Статичний характер. 3) Слабка деталізація обмежень. 4) Недостатня увага на часових слотах.

Продовження таблиці 1

№ з/п	Методи формування розкладу	Переваги	Недоліки
3	Метод імітаційного моделювання	1) Більш реалістичний та гнучкий. 2) Можливість тестування різних сценаріїв. 3) Можливість виявлення переваг ресурсів	1) Трудомісткість і складність розробки. 2) Відсутність гарантії оптимальності. 3) Залежність від параметрів. 4) Ймовірнісний характер результатів.
4	Метод програмування з обмеженнями	1) Декларативність. 2) Ефективна обробка різноманітних обмежень. 3) Врахування м'яких обмежень. 4) Ефективний пошук рішень та раннє виявлення суперечностей. 5) Підтримка інкрементальних змін.	1) Проблеми масштабованості для об'ємних завдань. 2) Вимагає спеціалізованого програмного забезпечення. 3) Відсутність адаптивності.
5	Алгоритм мурашиної колонії	1) Здатність створення якісного розкладу. 2) Адаптованість до різних типів обмежень та критеріїв оптимізації. 3) Гнучкість до динамічних змін. 4) Стійкість до невеликих неточностей.	1) Обчислювальна і складність та час виконання. 2) Залежність від правильного вибору параметрів. 3) Відсутність гарантії глобального оптимуму. 4) Потребує місця для зберігання інформації.
6	Генетичний алгоритм	1) Ефективність у пошуку рішень для складних задач. 2) Можливість уникнути локальні оптимуми. 3) Гнучкість та адаптивність. 4) Можливість розпаралелювання.	1) Обчислювальна і складність та час виконання. 2) Складність налаштування параметрів. 3) Відсутність гарантії глобального оптимуму. 4) Складність розробки функції придатності та кодування рішення хромосомами.

З метою автоматизації процесу формування розкладу занять був розроблений вебзастосунок SchedGo, що виступає як централізована платформа для управління академічним розкладом. Як мову програмування для backend частини обрано JavaScript. Для створення серверної логіки використано платформу Node.js. Це сучасний інструмент для створення ефективних backend-рішень, який базується на JavaScript, що забезпечує єдність мови в усьому стеку. Завдяки асинхронній моделі обробки запитів Node.js забезпечує високу продуктивність, що критично важливо при роботі з великою кількістю одночасних підключень. На клієнтській стороні також використовується JavaScript. Для front-end реалізації застосовано бібліотеку React. Головною перевагою є використання віртуального DOM, що дозволяє ефективно оновлювати лише змінені елементи сторінки. Це значно підвищує швидкодію й полегшує створення інтерактивних інтерфейсів. Для збереження даних, таких як розклад, викладачі, академічні групи, тощо, використано базу даних MongoDB. Вона поєднує гнучкість нереляційних баз з потужністю традиційних СУБД, дозволяє зберігати документи у JSON-подібному форматі, що ідеально підходить для роботи з Node.js. Система підтримує індекси за будь-якими полями, що підвищує ефективність запитів, а також дозволяє зберігати великі об'єкти (наприклад, файли).

Для кращого розуміння загального функціоналу на рис. 4 зображено діаграму варіантів використання, на рис. 5 представлено діаграму класів бази даних для визначення логіки зв'язків між сутностями.

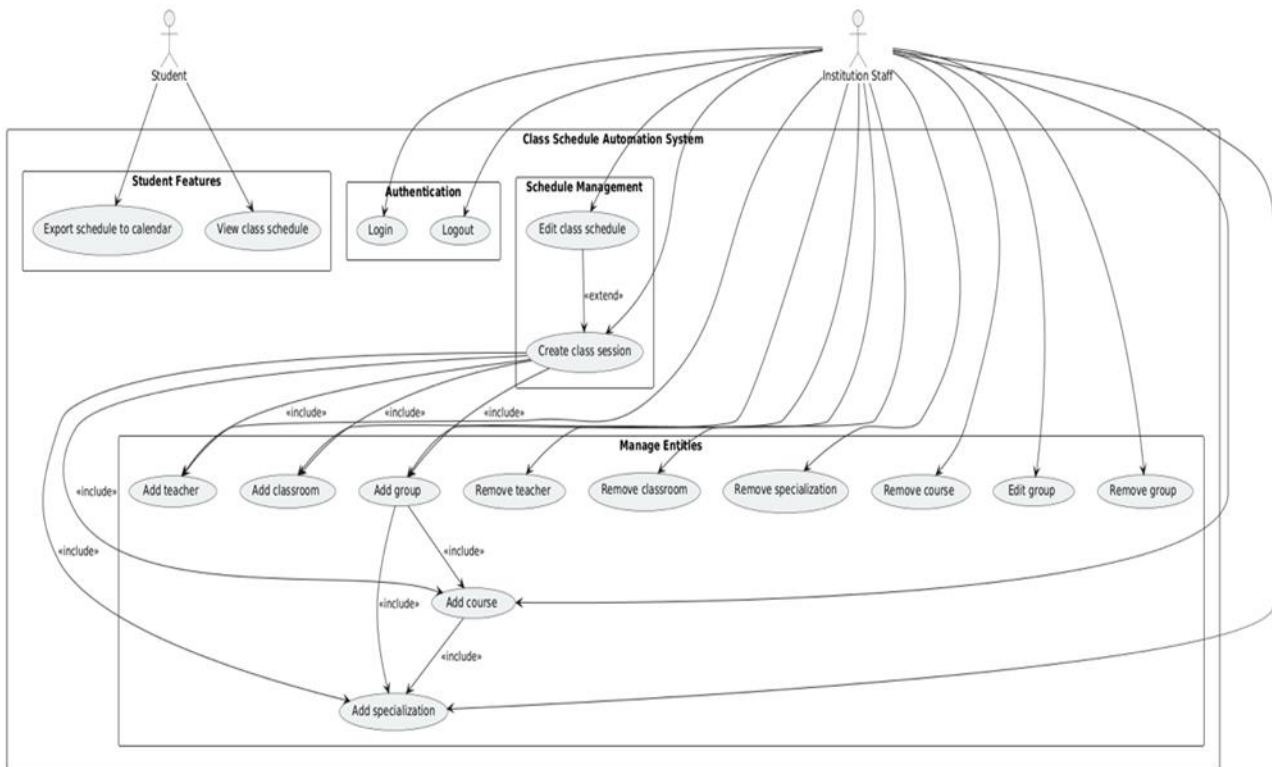


Рисунок 4. Діаграма варіантів використання

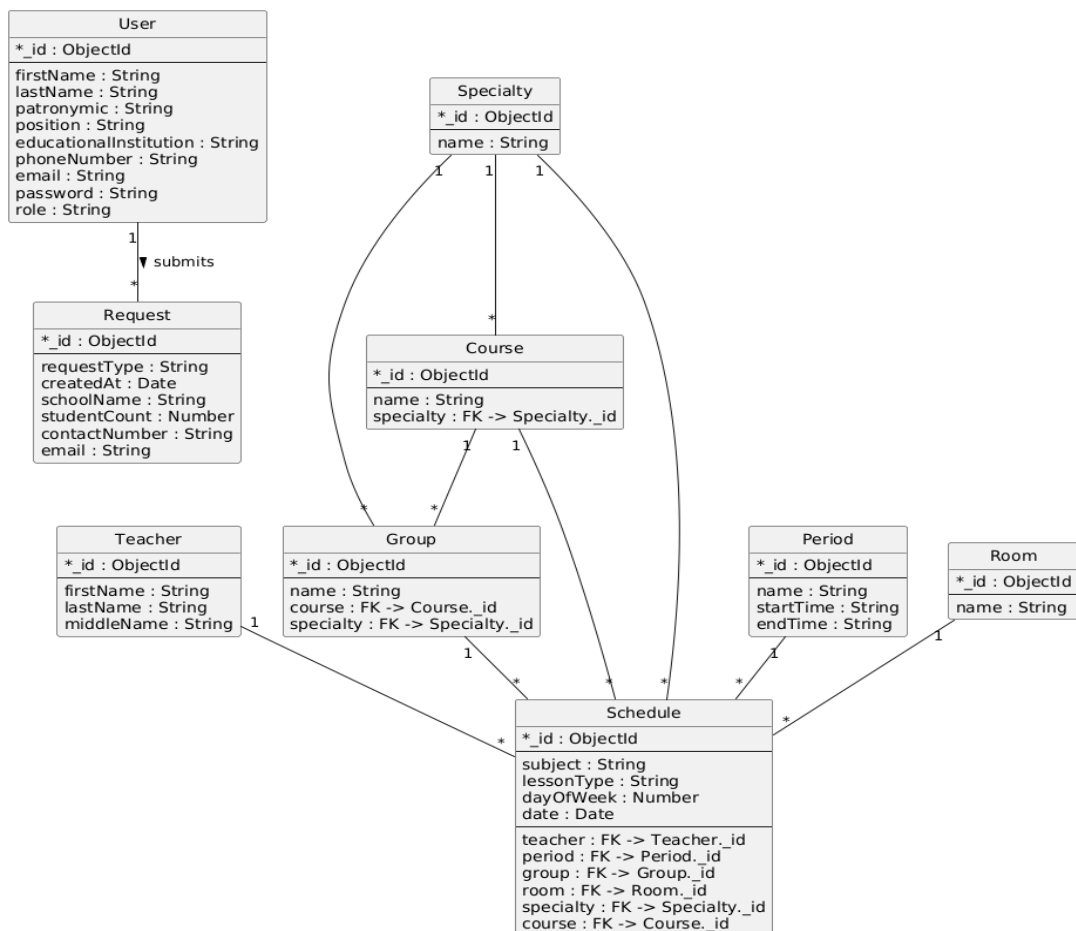


Рисунок 5. Діаграма структур баз даних

Система базується на ключових сутностях:

1. Користувач (User): фізична особа (адміністратор, викладач, студент) з персональними даними (ім'я, прізвище, логін, email, пароль, роль) та прив'язкою до навчального закладу (schoolId).
2. Запит (Request): фіксує звернення користувачів щодо додавання нового навчального закладу, містить тип, статус, дату та дані відправника.
3. Спеціальність (Specialty): назва освітнього напрямку, що може містити кілька курсів.
4. Курс (Course): рік навчання (1-4), підпорядкований певній спеціальності.
5. Група (Group): назва навчальної групи, що об'єднує студентів певного курсу та спеціальності.
6. Викладач (Teacher): прізвище, ім'я та по-батькові викладача.
7. Період (Period): часові рамки проведення занять (пар).
8. Кабінет (Room): номери аудиторій, у яких проводяться заняття.
9. Центральною частиною бази є сутність розклад (Schedule). Вона об'єднує в собі всю інформацію про окрему пару: назву предмета, тип заняття (лекція, практика тощо), день тижня, дату, а також зв'язки з викладачем, періодом, аудиторією, групою, курсом і спеціальністю. Кожне поле цієї моделі є зовнішнім ключем до відповідної сутності, що дозволяє не дублювати дані, а лише посилатися на них.

Таким чином, база даних побудована за принципами нормалізації, що забезпечує уніфікацію та зменшення надлишковості інформації. Завдяки такій структурі система здатна ефективно керувати складними навчальними розкладами та легко масштабуватись при збільшенні обсягу даних.

На рис. 6 представлено інтерфейс, з яким безпосередньо взаємодіє користувач, який переглядає розклад за спеціальністю, курсом та групою.

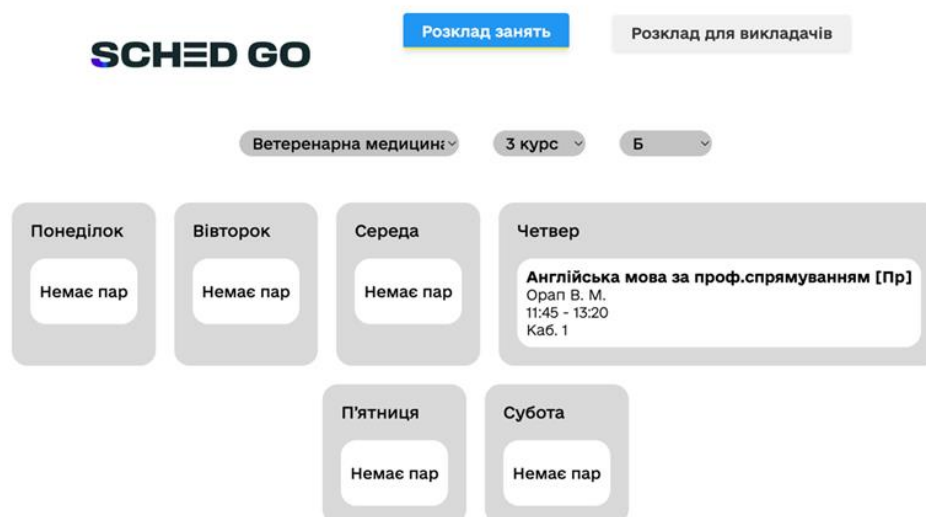


Рисунок 6. Користувацька частина відображення розкладу

Для швидкого перегляду розкладу занять та отримання повідомлень про зміну розкладу було розроблено Telegram-бот за допомогою мови програмування Python. Взаємодія з ботом відбувається через зручне меню, що дає змогу легко обирати розклад на сьогодні або на тиждень. Завдяки цьому бот допомагає ефективно організувати навчальний процес і бути завжди в курсі актуальної інформації.

Ще один важливий сценарій — створення нового заняття. Цей процес ініціюється адміністратором, який через вебінтерфейс обирає спеціальність, курс і групу. Далі зазначається дата проведення заняття, його назва, а також обирається час із фіксованого списку, що підтягується через API. Вид заняття (лекція, лабораторна тощо) обирається зі статичних значень, закладених у код. Останнім кроком є вибір викладача та аудиторії, дані про які також надходять через API. Після завершення всіх етапів інформація зберігається в базі даних, і нове заняття автоматично стає доступним для студентів у їхньому розкладі.

На рис. 7 представлена діаграма, що ілюструє логіку обміну інформацією між ключовими компонентами системи SchedGo — вебсайтом, Telegram-ботом, API, базою даних і користувачами — під час основних сценаріїв роботи: перегляд розкладу, взаємодія з ботом та створення нових занять.

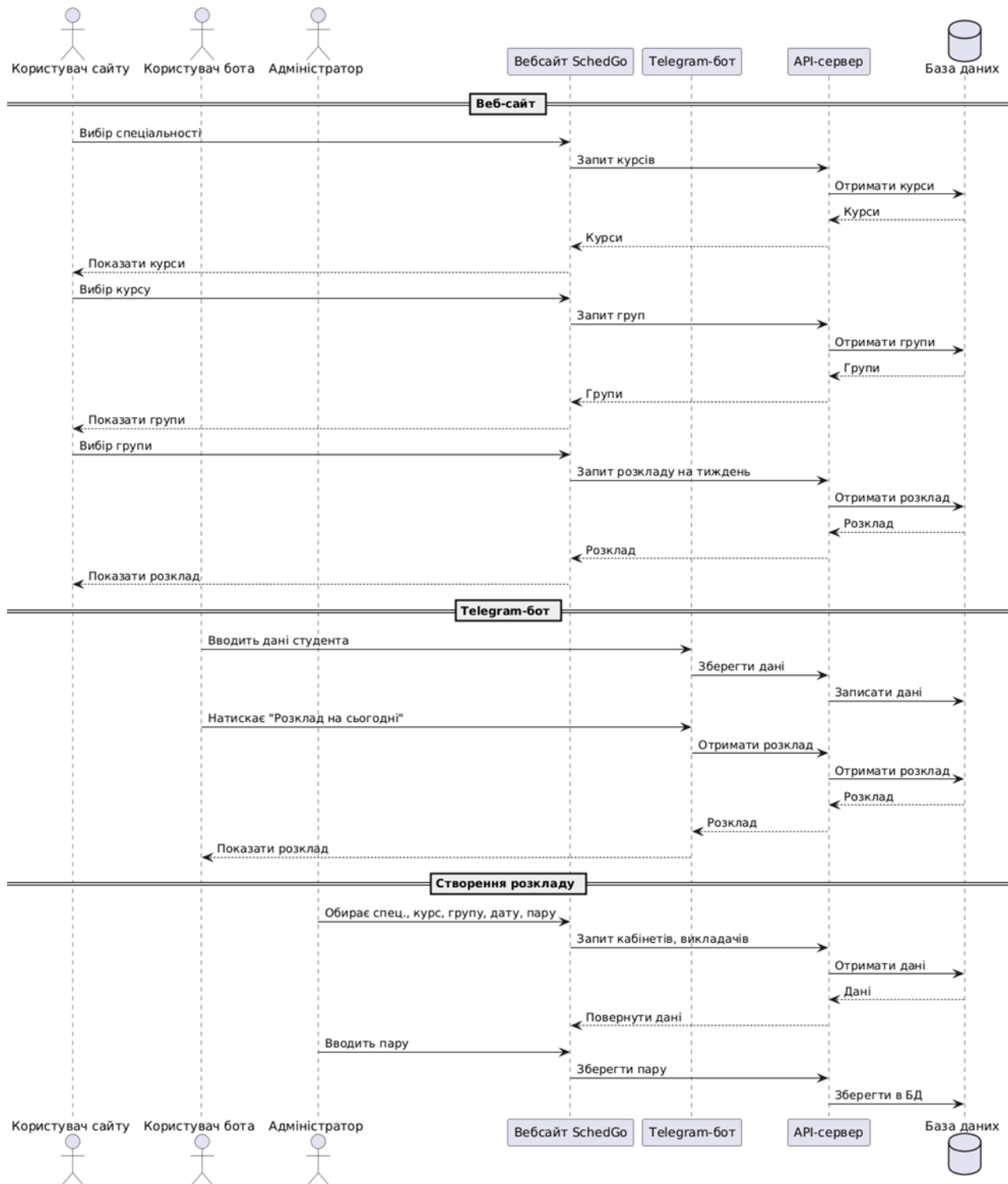


Рисунок 7. Діаграма потоків

На першому етапі взаємодії, користувач заходить на сайт <https://schedgo.online/schedule>, де йому пропонується обрати спеціальність. Система у відповідь на цей вибір надсилає запит до API, щоб отримати перелік курсів, прив'язаних до зазначеної спеціальності. Після отримання списку курсів користувач обирає потрібний, і тоді відбувається наступний запит — вже на

отримання груп, що відповідають зазначеним спеціальності та курсу. Завершивши вибір групи, користувач запускає фінальний запит, який повертає розклад на поточний тиждень. Усі ці дані проходять через API, що виконує відповідні запити до бази даних, обробляє їх і повертає результат вебінтерфейсу.

Інший шлях взаємодії — через Telegram-бот. Під час першого контакту з ботом користувач надсилає свої основні дані: спеціальність, курс і групу. Ця інформація зберігається в системі, що дозволяє надалі формувати запити автоматично. При кожному зверненні до бота — наприклад, натисканні кнопки «Розклад на сьогодні» — бот передає запит до API, використовуючи збережену інформацію. API, у свою чергу, звертається до бази даних і повертає відповідь з розкладом на поточний день або тиждень, залежно від дії.

Загалом, діаграма відображає чітку взаємодію між фронтом (вебсайт і бот), API та базою даних. Вона демонструє прозору логіку обробки запитів, автоматизацію дій користувача і ефективний обмін інформацією в рамках навчального процесу.

Особлива увага приділена безпеці: реалізовано реєстрацію, шифрування даних, захищену взаємодію з API [303].

Таким чином, у даному дослідженні були проаналізовані існуючі методи складання автоматизованого розкладу і представлено розробку вебзастосунка SchedGo та Telegram-бота, які виступають як централізовані платформи для управління академічним розкладом.

Вважаємо, що автоматизація розкладу у закладах освіти є важливим кроком до удосконалення навчального процесу, підвищення його ефективності та зручності для всіх учасників. Це інвестиція в якість освіти та оптимізацію адміністративних процесів.

SECTION 6. MATH

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.6.1

6.1 Consideration of the main methods and directions of research in asymptotic analysis of stochastic networks

Mass service is a finite set of nodes - systems of service, among which circulating requirements, passing between nodes in accordance with the routing matrix. When considering networks and mass service systems, their structure and algorithm of operation are specified, and the function of time interval distribution between successive delivery requirements, service time distribution function, number of serving devices, and the length of the maximum possible queue is specified. For networks, the number of service nodes is additionally indicated. In the theory of mass service, the Kendal symbolism is used to denote the SMO: $A/B/L/N$, where A and B determine the types of distribution functions for the input flow of requirements and service time, L – number of servicing devices, N – number of waiting places. Instead of A and B , you can insert characters from such a set: $\{M, E_r, HR, D, G\}$, where M means an exponential distribution (Markovian), E_r – Erlang distribution of order r (Erlangian), HR – hyper-exponential distribution of order R , D – degenerate distribution (Deterministic), G – distribution of the general type (General) [304].

Under the network of service in the network understand the system of mass service, consisting of L ($0 < L \leq \infty$) the same service and buffer (queue) volume N ($0 \leq N \leq \infty$). At $L=1$ the node is called single-line (single-channel), with $L = \infty$ – multichannel [305].

For those requirements that have completed the service in i - so the nodes are asked the probabilities of transitions to other nodes and the probability of leaving the network. Probabilities of transitions between nodes form a matrix of routing.

The external flow of requirements entering the network is determined by the coherent distribution of random variables, which are sequential intervals between the moments of receipt of claims. If these random variables are independent in aggregate,

then such a stream is called a stream with a limited aftereffect, and for its definition it is sufficient to specify a set of distribution functions, where τ_k – the time interval between receipt $(k-1)$ and k - requirements. An important role in the theory of systems and mass maintenance networks is played by the recurrence stream, for which the Poisson flow is a special case of a recurrent stream $x \geq 0$, where is the flow rate.

In the theory of stochastic systems and networks, it is often assumed that the service time at the nodes of the network is exponentially distributed. This is due to the fact that requirements are processed at a constant rate, and the length of the requirement is a random variable distributed according to the index law. At the same time, most models are based on time-consuming process requirements and distribution of service time. However, in practice, there are real cases where the intensity of the input stream depends on time. This aspect encourages the use of heterogeneous time-based processes for modeling real networks. Natural is the assumption of the periodic dependence of the intensity of the input flow from time to period of one day, week or month. Such models are much less explored than networks and systems with sustained-intensity flows. Some of the results can be found in the works [306].

Namely Lemoian investigated the asymptotic behavior of SMO with one maintenance device, an input Poisson stream, whose intensity is a periodic function of time and the general time of service requirements.

D. Hayman and W. Witt [307] reviewed the system $M_t | M | c$ and showed that, given the periodicity of the input stream, the process that describes the length of the queue is asymptotically periodic. The authors also obtained results regarding the strong asymptotic stability of the process describing the system. They set the ratio between the average number of requirements and the average time required by the system.

L. Brouwer [308] studied the type of SMO $BMAP | M_t | c$ (batch Markovian arrival processes), the input of which receives a periodic BMAP flow, the service time is distributed exponentially, and the intensity of service varies in time from time to time. Conditions of stability are proved in terms of intensities of receipt and

maintenance. Special class is selected $BMAP|M_t|c$ - systems, in which it is possible to simplify calculations to the level of homogeneous SMOs.

The SMO with one maintenance device and the periodic intensity of service is studied in the monograph by M. van Eenig [308]. For such systems, the time axis is divided into intervals of equal length, called cycles. During the cycle the device serves different queues of requirements. The order in which he "visits" the queues is the same for each cycle.

GI Falin [309] developed an analytical approach to the diffusion approximation of the queue in the system $M_t|G|1|\infty$ with periodic input flow. The author uses the principle of averaging: the periodic queue is approximated by the corresponding

stationary queue with the intensity of the input $\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t \lambda(u) du = \Lambda$. We find

conditions under which this approximation gives a good result. It is shown that the principle of averaging takes place for SMO in the conditions of high loading in the sense of convergence of the non-stationary process to the stationary one, which is a Brownian motion with reflection [310].

It should be noted that stochastic networks with periodic input flow have practically not been investigated.

A lot of work is devoted to the analysis of mass service models in conditions of overload mode of operation. An overloaded mode means that the characteristics of the model depend on some parameter n , and with $n \rightarrow \infty$ The average system load is one unit (or even more than one). The study of overloaded mode has a long history and distinguishes several areas oriented to different classes of models of mass service. Many authors have been dealing with incoming recovery processes, independent maintenance hours, and maintenance processes that are independent of the current queue and time length. For this case, the convergence of the characteristics of the normalized queue length to the solution of the differential equation or to the Brownian motion with reflection in the corresponding boundaries is proved. The methods of analysis in these works mainly use the functional central boundary theorems for the

input stream, the process of maintenance and the routing process [311].

Another direction contains an analysis of Markov models of mass service, in which there is a dependence on the state of the system. In this case, the analysis method is mainly based on martingale technique. Using this technique, proved the convergence of the maintenance process in the network $[M | M_Q | 1 | c_n]^r$, which depends on the length of the queue, under the conditions of the overload mode of operation before the diffusion process. For networks of type $[M | M_Q | 1 | \infty]^r$ in the works the convergence to the diffusion process is investigated. Markov models, which depend on time, are considered in particular in the works. Some results for incoming processes depending on the network status and total distribution of service times are given in.

Not only for the development of the theory, but also from the practical point of view, it is important to examine the processes of service in general assumptions both in relation to the flow of requirements and in relation to the distribution of service time. It is commonly believed that the input flow with a very good approximation can be considered Poisson, at least in the tasks of telephony and tasks of information processing. This idea is based on the limit theorem on the total flow generated by many plurality of low intensity. Therefore, it is first and foremost important to study models in which the duration of service has an arbitrary distribution.

Many works devoted to this area of research of stochastic systems and networks. They got a lot of interesting results regarding the values of the main characteristics of the operation of the model [312].

Mass-servicing networks with arbitrary service time, in particular under conditions of overload mode of operation, were investigated in works of MI. Mostly open and closed networks with one maintenance device in each node were investigated.

Interesting results from the research of Markov and non-Markov systems and mass-servicing networks with unlimited number of service devices have recently been received by a group of Tomsk scientists. They proposed and developed an approach called the sifted flow method. This method allows the problem of research of the non-Markov system (network) service with an unlimited number of devices for servicing to

reduce the problem of the analysis of a non-stationary flow that is marketed. In particular, presents the study of an open-source mass service network with input high-intensity flow requirements called the High Intensivative Markov-Modulated Poisson Process (HIMMPP) with unlimited number of servicing devices in nodes, Markov routing, and recurrent maintenance of requirements in conditions of increasing intensity input stream. An asymptotic analysis of this network is carried out. Using the method of dynamically sifted flow for such networks, the authors obtained an expression for calculating the average values of the number of devices employed in the nodes of the described network. It is also established that under the conditions of unlimited increase of the intensity of the input stream, the multidimensional distribution of probabilities of the number of employed devices in the nodes is approximated by a multidimensional normal distribution. In this paper we obtain the characteristics of this distribution in the form of a vector of mathematical expectations and the covariance matrix.

The basic approaches to the study of mass service networks are based either on the direct method of finding expressions for the probabilities of the network conditions using the technique of constructing equations of the local balance, or on the method of constructing recurrent equations for the mean values. The above methods allow us to find the exact solution for multiplicative or, as they are often called, locally balanced networks, the stationary probabilities of states of which have a multiplicative form.

Jackson, Gordon, Newel [313], began to study the simplest homogeneous exponential networks. For these networks, such an interesting fact was established: the stationary probabilities of the network states have a multiplicative form: in the stationary mode, the distribution of the number of requirements at the nodes of the network is independent, and their product is the stationary distribution of the entire network. This fact became the basis for further analyzes of the future of the MEMO of the general type, as well as the development of effective algorithms for the calculation of the characteristics of stochastic networks [314].

The search for the conditions for the existence of a multiplicative form of stationary distribution and in the last decades is reduced mainly to operation with the

local equilibrium equation. This leads to the expansion of known results on a more general-looking network. The disciplines of service are generalized, depending on the intensity of the input stream from the state of the network and / or time, etc. In recent years, a number of results have been obtained, which greatly expands the possibilities of analysis of mass service networks. The main methods of analysis, which today are rather complete character, are distinguished. Here are some basic research methods.

The Martingual approach based on the semimartingal representation of the investigated process and the use of a well-developed apparatus for the theory of martingales for the diffusion approximation of service networks, for solving filtration and optimal control problems, and also for statistical analysis of networks.

The recurrence approach, which consists in the recurrence relations for the characteristics of the system under consideration, and for the further asymptotic analysis, the boundary theorems on the convergence of stochastic recurrence schemes to the solution of stochastic differential equations (SDE). This method is used to study a wide class of service systems with repeated calls and in the study of local area networks with multiple access protocols. VV Anisimov introduced a class of random switching processes, which is a convenient means for describing the asymptotic behavior of a broad class of stochastic models. The switching process, the author calls the service process, which can be represented as a semi-Markov process. As a rule, the random environment in which the service model operates is considered as an external process, which is not influenced by the behavior of internal processes. The theorems of the type of the principle of averaging and diffusion approximation are proved in [309], and some classes of systems and mass service networks that can be represented by switching processes are considered. Asymptotic behavior has been investigated for these models, in particular under conditions of low-intensity input flows and under over-mode conditions.

The method of diffusion approximation in work [315] is used for analysis in the conditions of high load of open models of computer networks with arbitrary interval distributions between the moments of receipt of requirements to the network and the duration of their service. In this paper, common closed exponential stochastic networks

are also investigated, when the number of requirements in them indefinitely increases. For such networks, conditions for congestion are formulated, in which the proposed deterministic and Gaussian approximations for the process of queue lengths are proposed. The authors managed to obtain an asymptotic schedule for the main indicators of the functioning of the networks.

Non-stationary mass service systems (SMO) also studied in works A.I. Seyman, who describes the process of serving claims in terms of birth and death processes and examining the SMO with the help of an advanced device for these processes. The proposed method is based on the logarithmic norm of the linear operator and the special transformation of the cut-off matrix of intensities of the Markov chain under consideration. This method is applicable to the class of Markovian SMO. In particular, is devoted to the estimation of the convergence velocity for different types of inhomogeneous Poisson flows with a specific form of heterogeneity. Namely, when the intensity of birth and death (the intensity of the input flow and service) is asymptotically periodic functions of time [316].

The given different approaches allow the experts to choose from them the most convenient and effective in a concrete situation. The data of numerical and simulation modeling of networks demonstrate the fact that the results of approximative formulas are quite close to precise with a sufficiently large load.

In the classical theory of mass maintenance, there are not too many models whose research can be performed analytically and obtain final results in the form of formulas for probability-time characteristics of the SMO. These are primarily systems whose processes of changing states are described by the Markov process with a set of states. Semi-Markov systems, which can be used to analyze the method of the embedded Markov chains, are also included here. As an example, we can recall the formula of the Polachek-Hinchin system $M | G | 1$. Erlang's formulas are also known for N - channel systems with arbitrary distribution of service time and stationary Poisson input flow, the process of changing the states of which is non-Markov.

At the same time, a large number of studies of real systems in various subject areas, in particular telecommunication systems, economic systems, made it possible to

conclude that the essential inadequacy of the Markov models is real data. Research of real complex systems is carried out, as a rule, by numerical methods or by means of simulation modeling with all the disadvantages arising from these methods.

An alternative approach is the use of the asymptotic analysis method for the study of complex systems.

Different variants of asymptotic conditions are considered: the maximum interval of observation, the small or high intensity of service, the large delay of requirements in the source of recurring calls, the heavy load in models of real computer networks controlled by random multiple access protocols [317].

Asymptotic methods in the theory of mass service, as a rule, are understood by three following directions of research, the main purpose of which is the study of complex multidimensional servicing processes by approximating their processes with a simpler structure.

1. Asymptotic analysis of explicit formulas or equations describing the distribution (usually stationary) of one or another system characteristic. Since today the theory of mass service has exhausted almost all cases of "explicit solvability" of service systems, the search for other areas of asymptotic analysis is becoming relevant.

2. The second direction is much wider and related to the study of the limiting behavior of the most random processes describing the work of the system, when converging the system with some of its critical state. In the work of [317] shows that the basis of the phenomena arising in overloaded systems lies in the well-known principle of invariance. This principle allows using the Wiener process to describe relatively complex processes generated by sums of random variables.

The main objective of the second direction is to prove the boundary theorems and to identify the maximum general conditions under which their statements will be valid (for example, the convergence of the normalized queue length to the diffusion process). The methods in this direction obviously differ significantly from the methods in §1 and are based, as a rule, on the use of general functional boundary theorems for random processes [318].

3. The third direction is connected with the theorems of stability (or continuity). Essentially, the boundary theorems for processes are also considered here: the conditions under which service systems will be close (in the sense of the distribution of a process describing the system) are set to a given system. The term "stability" is due to the fact that this type of theorem allows us to draw conclusions about small changes in stationary characteristics with small disturbances of the system parameters.

Often, the three classes of processes serve as limitations:

- Gaussian processes;
- diffusion processes;
- processes with independent growth.

In this paper, we will use multidimensional Gaussian processes to construct approximative processes for the requirements processing process in stochastic networks of different types.

The main problems that are considered in the dissertation are related to the approximation of some random processes that arise in the study of stochastic networks, with the help of others - simpler and better investigated. In this case, it is necessary to formalize which processes will be considered close. Naturally, in different tasks, the requirements for proximity can be different.

The concept of convergence of random processes is the basis for using the methods of the theory of random processes in problems of asymptotic analysis of various characteristics of mass service networks. Let's consider different approaches to the formalization of the concept of convergence of random processes. (see, for example [319]) Let given sequence of processes $\xi^{(n)}(t, \omega)$ that process $\xi^{(0)}(t, \omega)$. A well-known notion of the convergence of random processes is the weak convergence of finite-dimensional distributions $\xi^{(n)}(t, \omega)$ to the corresponding distributions $\xi^{(0)}(t, \omega)$:

$$P\{\xi^{(n)}(t_j, \omega) \leq x_j; j = 1, \dots, k\} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} P\{\xi^{(0)}(t_j, \omega) \leq x_j; j = 1, \dots, k\}$$

to all $k, t_1, \dots, t_k$ and $x_1, \dots, x_k$ such that

$$P\{\xi^{(0)}(t_j, \omega) = x_j\} = 0, \quad j = 1, \dots, k.$$

Such a convergence is indicated

$$\xi^{(n)}(.) \xRightarrow{d} \xi^{(0)}(.) .$$

Symbol $\xRightarrow{d}$ it is also stored to indicate a weak convergence of distributions of random variables (convergence at the points of continuity of the boundary distribution function).

As is known, the weak convergence of finite-dimensional distributions does not imply a convergence of characteristics, determined by the behavior of the trajectory in general, that is, different functionalities $f(\xi^{(n)})$ from the process $\xi^{(n)}(t)$ (for example, the average length of the queue $\frac{1}{T} \int_0^T \xi^{(n)}(t) dt$, value of maximum queue $\sup_{0 \leq t \leq T} \xi^{(n)}(t)$). To do this, some additional conditions associated with a fairly regular behavior of the trajectories of processes must be met. $\xi^{(n)}(t)$ [320].

Consequently, the determination of the convergence of processes in general depends on the distribution of which of the functionals $f(\xi^{(n)})$ we want to get closer to distributions $f(\xi^{(0)})$.

Different approaches to the study of the conditions for the convergence of functionals from random processes were developed in the works [321].

In the works of M. Donsker and Yu.V. Prokhorov studied the boundary behavior of functional distributions from processes constructed on the sums of independent random variables. It was assumed that the functionals are continuous in the topology of uniform convergence, and the boundary process is the process of Brownian motion. It was argued that the desired boundary distribution coincides with the distribution of the same functional from the process of Brownian motion. Statements of this kind have been called "principle of invariance".

In [322] has published a number of papers in which the general problems concerning the boundary behavior of functional distributions from random processes are solved and solved. Abandoned the condition of the continuity of processes and considered the natural class in the theory of probabilities of processes that do not have

breaks of the second kind. As a result, the topology of uniform convergence in the space of such functions has to be replaced by a new one, since space becomes inseparable. They introduced a new topology in the space of functions without ruptures of the second kind, which now carries the name of the author. Considering the class of continuous functions in this topology of functions from the sequence of random processes, we establish necessary and sufficient conditions under which the boundary of the distribution of the functional under consideration exists and coincides with the distribution of the same functionality from the boundary process. These general theorems have been applied to specific classes of processes: processes with independent increments, Markovian and Gaussian processes [323].

So let it go X – complete metric separable space with metric $\rho(x, y)$, B_X – σ -algebra of Borel subsets in it, $\xi^{(n)}(t)$, $0 \leq t \leq T$, $n \geq 1$, – sequence of random processes with values in X . We will assume that the sample trajectories $\xi^{(n)}(t)$ at each one n with probability 1 belong to the set of functions $D_{[0, T]}(X)$, which have no breaks of the second kind and continuous business (at the point T – to the left) [324].

Let $F_S(B)$ – set of functionals given in space $D_{[0, T]}(X)$, measurable relative σ -algebras of cylindrical sets $B_{D_{[0, T]}(X)}$, and continuous with respect to some type of convergence (let's say S -convergence) on a set of functions B . This means that if the sequence of functions $x_n(\cdot) \in D_{[0, T]}(X)$ S -coincides with $x_0(\cdot)$ and $x_0(\cdot) \in B$, then

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n(t)) = f(x_0(t)). \quad (1.1)$$

For a sequence of random processes $\xi^{(n)}(t)$, $t \geq 0$, such that $\xi^{(n)}(t) \xrightarrow{c\pi} \xi^{(0)}(t)$, $t \in Q$, where Q – it is somewhere dense set of points on everywhere $[0, T]$, containing points 0 and T , with a weak convergence of measures μ_n , generated $\xi^{(n)}(t)$ in space $D_{[0, T]}(X)$ with some metric h such that is appropriate to her σ -algebra of Borel sets is contained in σ -algebra of cylindrical sets follows $f(\xi^{(n)}(\cdot)) \xrightarrow{c\pi} f(\xi^{(0)}(\cdot))$, where $f(\cdot)$ – any limited and continuous metric h functional on $D_{[0, T]}(X)$.

In studying the conditions of convergence of classes of functional, continuous with respect to different metrics h , with the use of Prokhorov's theorem we must look for a general form of compact in the corresponding space. In this connection, when studying the conditions of convergence of specific functionals, it is sometimes more convenient to use constructive probabilistic methods and the method of one probabilistic space developed by [325]. We note that the conditions for convergence for a "certain" functional are given in the work [326].

We give in accordance with [327] the conditions for the convergence of functions that are continuous on the set of functions B relative to some S -convergence. Assume that there is an inseparable monotone non-decreasing in $c > 0$ functional $\Delta_S(c, x(\cdot))$ such that sequence $x_n(\cdot)$ S -coincides with $x_0(\cdot)$ if and only if the conditions are fulfilled:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n(t) = x_0(t), \quad t \in Q, \quad (1.2)$$

where Q – some numbered dense set of points on everywhere $[0, T]$, containing points 0 and T ;

$$\lim_{c \rightarrow +0} \overline{\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta_S(c, x_n(\cdot))} = 0. \quad (1.3)$$

These conditions and that $x_0(\cdot) \in B$ enough to fulfill the condition (1.1). [317] introduced five different types of convergence satisfying (1.2), (1.3). For our purposes we confine ourselves to the introduction of uniform convergence (U - convergence), since during the whole work the limiting process has a probability unit of continuous trajectories [328].

Let's put it

$$\rho_U(x(\cdot), y(\cdot)) = \sup_{0 \leq t \leq T} \rho(x(t), y(t)).$$

Sequence $x_n(\cdot)$ called convergent in a uniform topology (U -converging) to $x_0(\cdot)$ on the segment $[0, T]$, if

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \rho_U(x_n(\cdot), y_n(\cdot)) = 0.$$

Sequence $x_n(\cdot)$ called convergent in J - topology (J -converging) to $x_0(\cdot)$ on the segment $[0, T]$, if there is a sequence of continuous mutually unambiguous mappings $\lambda_n(t)$ on the segment $[0, T]$ on yourself such that

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{0 \leq t \leq T} \left\{ \rho_U(x_n(t), x_0(\lambda_n(t))) + |\lambda_n(t) - t| \right\} = 0.$$

Note that J - Convergence means that you can enter a "small" deformation of time (replacing time using the function $\lambda_n^{-1}(t)$) for a prefetch function $x_n(t)$ in such a way that the moments of the jumps of functions $x_n(\lambda_n^{-1}(t))$ and $x_0(t)$, who do not go to 0, coincide, and functions will be close in uniform topology. From the definition it follows that with U - convergence follows J - convergence [329].

By $D_{[0, T]}^m$ we will denote the space of functions with values in $\mathbb{R}^m$ without breaks of the second kind and continuous business (at the point T – left). Sequence of functions $x_n(t)$ with $D_{[0, T]}^r$ called convergent in a uniform topology (U -converging) to $x_0(t)$ on the segment $[0, T]$, if

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{0 \leq t \leq T} |x_n(t) - x_0(t)| = 0$$

$$(|a| = \sqrt{\sum_{k=1}^m a_k^2} - \text{the norm of the vector } a' = (a_1, \dots, a_r)).$$

The conditions of convergence can be described in terms of the sequence itself, using the concept of the continuity module [330].

Let's denote $t_c = \max(0, t - c)$, $t^c = \min(T, t + c)$. Let's put it

$$\Delta_U(c, t, x(\cdot)) = \sup \left\{ \rho(x(t), x(t_1)) : t_c + \frac{c}{2} \leq t_1 \leq t^c - \frac{c}{2} \right\};$$

$$\Delta_J(c, t, x(\cdot)) = \sup \left\{ \min(\rho(x(t), x(t_1)), \rho(x(t), x(t_2))) : t_c < t_1 < t < t_2 < t^c \right\},$$

Let's denote through S one of the topologies U , J . Let's put it

$$\Delta_S(c, x(\cdot)) = \sup_{0 \leq t \leq T} \Delta_S(c, t, x(\cdot)).$$

In [331] it is shown that the introduced topologies satisfy the conditions (1.2), (1.3).

For functionals from random processes, the conditions of weak convergence look like this.

In order for any functional $f(\cdot) \in F_S(B)$ distribution $f(\xi^{(n)}(\cdot))$ weakly coincided with the distribution $f(\xi^{(0)}(\cdot))$, enough to

$$1) \quad \xi^{(n)}(t) \xRightarrow{d} \xi^{(0)}(t), \quad t \in Q,$$

where Q – a number of dense sets of points on everywhere $[0, T]$, containing points 0 and T ;

2) for any one $\varepsilon > 0$

$$\lim_{c \rightarrow +0} \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} P\{\Delta_S(c, \xi^{(n)}(\cdot)) > \varepsilon\} = 0;$$

$$P\{\xi^{(0)}(\cdot) \in B\} = 1.$$

In the future, if the two last conditions are fulfilled, we will say that the sequence $\xi^{(n)}(\cdot)$ S - coincides with $\xi^{(0)}(\cdot)$.

Note that a uniform topology is commonly used in the study of convergence to continuous functions. If the boundary function is discontinuous, then U - convergence can occur only in cases where for any $\varepsilon > 0$ starting with some n moments of jumps larger than ε , coincide, which in practice occurs quite rarely [332].

As can be seen from the above, the variable intensity of the input flow requirements is much closer to real networks, but the intensity dependence of time adds additional difficulties in the study of the corresponding models. The analysis of such systems and mass-servicing networks is a complex mathematical task. At the same time, despite the fact that some published materials contain studies of mass service systems with variable parameters, there is still no general methodology for researching such models. In general, stochastic networks with variable characteristics have been studied very little.

One of the approaches that may be promising in this area of research is the use of asymptotic methods such as Gaussian or diffusion approximation. This approach is developed in this dissertation. It examines the behavior of the requirements servicing process in multichannel networks of the Markov and Semi Markov type, in which the

input flow parameters depend on time and fulfill the critical loading conditions. Models of stochastic networks described in the dissertation are quite close to real information and computer networks and communication networks. From the systems of mass service they are distinguished, first of all, by the multidimensionality of the service process and the complex structure of the input stream for each service node of the network [333].

In the work for multichannel stochastic networks with variable external load, asymptotic research methods based on the approximation of the hopping processes of service requirements by continuous Gaussian and diffusion processes were proposed. In particular, the network with periodic and asymptotically periodic external input flow requirements is considered. In the case when network maintenance is not index-distributed, a phase-in-service case is distinguished. It is shown that by increasing the number of service nodes and the dimensionality of the phase space, it reduces to the Markov stochastic network.

SECTION 7. MECHANICAL ENGINEERING

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.7.1

7.1 Лазерне зміцнення деталей сільськогосподарської техніки

Питання збільшення ресурсу виробітку різноманітних деталей сільськогосподарської техніки нині не втрачає своєї актуальності. Забезпечення вищої міцності тих зон деталей, які найбільше піддаються зносу, є однією із першочергових задач, що стоять перед виробниками сільськогосподарської техніки.

На даний момент у виробництві багатьох країн світу для зміцнення виробів із сталі та сплавів ефективно використовується метод поверхневої лазерної обробки. Тому має сенс дослідження можливості ефективного застосування на практиці методу поверхневої лазерної обробки для зміцнення відповідних деталей машин у галузі сільського господарства.

Для цього необхідно звернути увагу на особливості використання даного методу та дослідити ефективність його застосування для зміцнення зон найбільшого зносу і вплив на ресурс виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

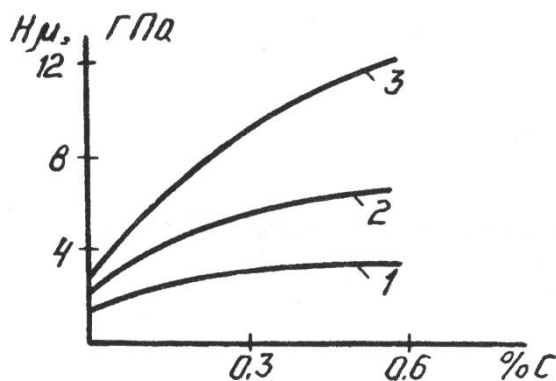
7.1.1 Застосування лазерного зміцнення сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь

Для виробників ґрунтообробних машин важливою задачею є забезпечення вищої міцності тих зон робочих органів, які найбільше піддаються зносу. Внаслідок абразивного зношування робочих поверхонь відбувається втрата первинної форми різальних елементів, що призводить до збільшення тягового опору ґрунтообробних машин та витрат паливно-мастильних матеріалів. Виникає потреба в заточуванні або заміні зіпсованих деталей.

Зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин може успішно здійснюватися за допомогою методу поверхневої лазерної обробки [334-338].

Для виготовлення робочих органів ґрунтообробних машин в абсолютній більшості випадків використовується сталь 65Г [334]. Тому актуальним є дослідження властивостей цієї сталі після лазерного зміцнення.

Як відомо, лазерне зміцнення сталі забезпечить тим вищу твердість матеріалу, чим більший вміст у сталі вуглецю (рис. 1) [336].



1 – без зміцнення; 2 – звичайне гартування; 3 – лазерне гартування

Рисунок 1. Вплив вуглецю на твердість сталей

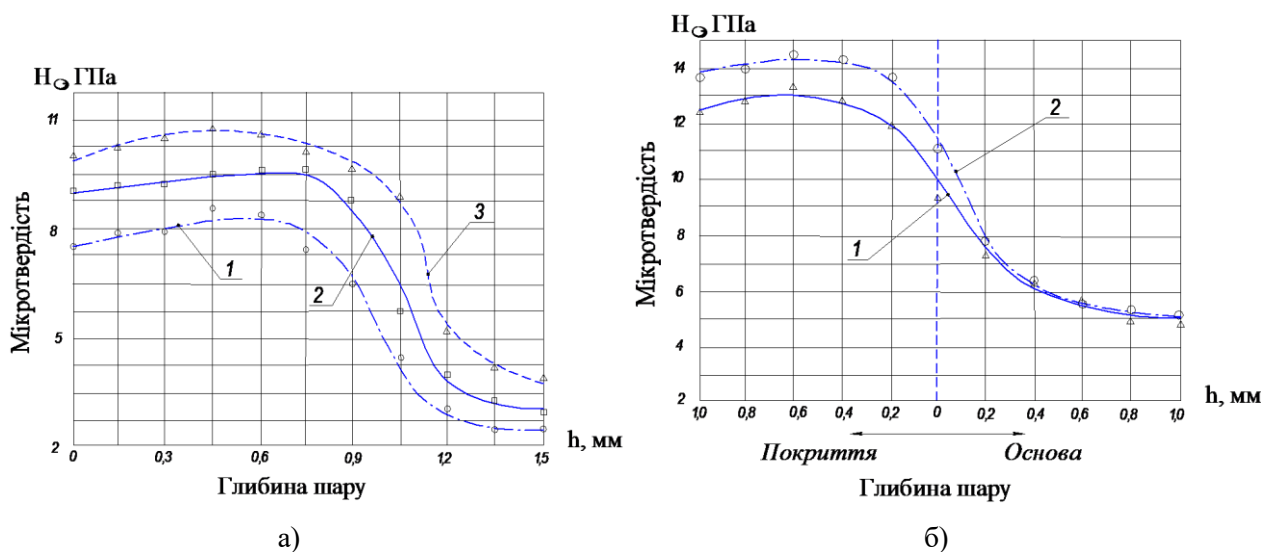
З цих позицій застосування лазерного зміцнення сталі 65Г є більш ефективним, ніж інших сталей з меншим вмістом вуглецю, таких як 45 чи Л53.

При дослідженні методу поверхневої лазерної обробки робочих органів ґрунтообробної техніки, виготовлених із сталі 65Г, необхідно обґрунтувати раціональні режими лазерної обробки для отримання потрібних властивостей і оптимальної товщини зміцненого шару з метою створення умов самозагострювання та провести комплекс досліджень властивостей зміцнених поверхневих шарів зразків деталей робочих органів ґрунтообробних машин.

Доцільність застосування технологій лазерного зміцнення різальних елементів при виготовленні деталей робочих органів ґрунтообробних машин показали стендові та експлуатаційні дослідження, які виявили підвищення їх зносостійкості, реалізацію ефекту самозагострювання і подовження ресурсу.

Відомо, що у процесі зношування поверхонь робочих органів та для реалізації умов самозагострювання під час їх зміцнення важливим фактором є глибина зміцненого шару, на яку впливають параметри поверхневої лазерної обробки.

В результаті застосування лазерного зміцнення таких сталей, як 45, Л53 та 65Г видно, що найбільшу мікротвердість по глибині зміцненого шару серед них має сталь 65Г (рис. 2а) [335], так як в ній найбільше міститься вуглецю, що підтверджує наведену вище закономірність (див. рис. 1). У випадку лазерного наплавлення на сталь 65Г покриття зі сплаву ПС-14-60 досягається збільшення мікротвердості у наплавленому шарі, а додавання карбіду бора у даний сплав (ПС-14-60 + 6%B₄C) дозволяє отримати ще більше підвищення мікротвердості поверхні зміцненого матеріалу (рис. 2б) [335].



а) – розподіл мікротвердості в сталях після лазерного зміцнення ($q = 8 \cdot 10^7$ Вт/м²; $\tau = 0,3$ с):
1 – сталь 45, 2 – сталь Л53, 3 – сталь 65Г;

б) – розподіл мікротвердості в покриттях після лазерного наплавлення на сталь 65Г
сплаву ПС-14-60 (крива 1) та сплаву ПС-14-60 + 6%B₄C (крива 2)

Рисунок 2. Розподіл мікротвердості по глибині зміцненого шару

Дослідження специфічного впливу лазерного випромінювання на властивості зразків і деталей робочих органів ґрунтообробних машин, проведені в даній роботі [335], показують утворення дрібнодисперсної мартенситної структури, рівномірний розподіл карбідів і боридів в матриці поверхневого шару, перерозподіл атомів легуючих елементів і домішок у зонах лазерного впливу, зменшення піку сполуки Fe₂O₃ після лазерної обробки у порівнянні з об'ємною термообробкою, зменшення (до 5%) пористості шарів при лазерному наплавленні у порівнянні з наплавленням СВЧ; плавний перехід мікротвердості зміцненого шару до мікротвердості основи (максимальна мікротвердість при

лазерній термообробці складає 8–12 ГПа, а при лазерному наплавленні – 12–14 ГПа); підвищення міцності зчеплення шару наплавлених покриттів з основою.

Найменший лінійний знос та інтенсивність масового зносу за результатами стендових досліджень спостерігаються для дослідних зразків робочих органів зі сталі 65Г, зміцнених методом поверхневої лазерної обробки.

У порівнянні з об'ємним гартуванням лазерна термообробка дозволяє в 1,3–1,4 рази зменшити знос відповідних поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин, а в порівнянні з базовою технологією індукційного наплавлення застосування лазерного наплавлення сплаву ПС-14-60 + 6%B₄C дозволяє зменшити знос у 1,7–1,8 рази. Застосування технології лазерного наплавлення з додаванням карбиду бора дозволяє тривалий час зберігати вихідну геометричну форму деталі. Застосування технологій лазерного зміцнення стримує підвищення тягового опору в процесі обробітку ґрунту робочими органами ґрунтообробних машин, що позитивно впливає на економію паливно-мастильних матеріалів.

Для створення зносостійких шарів на різальних елементах робочих органів ґрунтообробних машин та забезпечення реалізації ефекту самозагострювання існують розроблені технологічні схеми зміцнення з використанням методу поверхневої лазерної обробки. За рахунок зменшення енергетичних витрат при зміцненні та підвищенні ресурсу робочих органів спостерігається значний загальний економічний ефект від впровадження технології лазерного наплавлення у виробництво стрілочастих лап культиваторів.

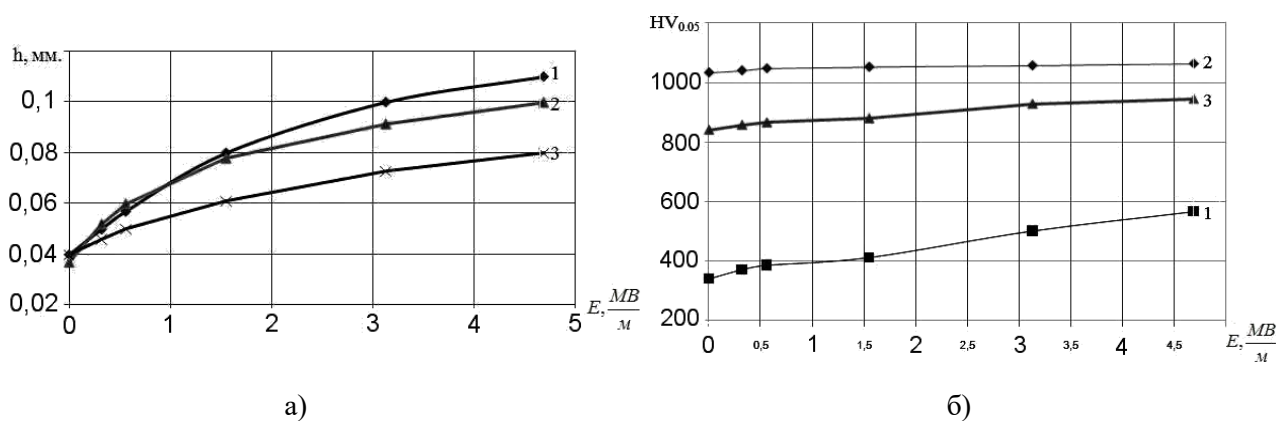
На даний момент вже розроблено технологію зміцнення дисків для борін зі сталі 65Г [338]. В ній пропонується додатково керувати процесом лазерного термозміцнення металів шляхом використання електростатичного поля. Розроблено методику розрахунку параметрів технологічних процесів термозміцнення, що застосовується на етапі технологічної підготовки виробництва, яка визначає умови досягнення заданої глибини термозміцнення металів під впливом лазерного випромінювання в електростатичному полі.

Наявність двох зон у поверхні металу показують результати мікроструктурного аналізу загартування сталі 65Г без оплавлення при впливі енергії накачування активного елемента лазера $W = 3,8$ КДж. Перша зона має структуру мартенситу, її мікротвердість становить $841 \text{ HV}_{0.05}$. Друга зона являє собою мартенсит і троостит, її мікротвердість складає величину $494 \text{ HV}_{0.05}$. Глибина зони термічного впливу становить $0,04$ мм.

Під впливом електростатичного поля під час лазерного загартування твердість першої зони зростає до $946 \text{ HV}_{0.05}$, а твердість другої зони майже не змінюється й становить $501 \text{ HV}_{0.05}$. При цьому глибина зони термічного впливу зростає до $0,08$ мм.

На цих дослідних зразках спостерігається різка границя переходу від зміцненої зони до матриці, зона термічного впливу виявляється чітко.

Певне збільшення мікротвердості й значне збільшення глибини зміцненої зони до 2-х разів у порівнянні зі звичайною обробкою спостерігається в результаті мікроструктурного аналізу сталей при обробці лазерним випромінюванням у режимах, близьких до температури плавлення й під впливом електростатичного поля напруженістю 5 МВ/м (рис. 3) [338].



а) – залежність глибини h ; б) – залежність твердості $\text{HV}_{0.05}$
1 – Сталь 10, $W = 3$ кДж; 2 – Сталь 65Г, $W = 4,5$ кДж; 3 – Сталь 65Г, $W = 3,8$ кДж

Рисунок 3. Залежність глибини h та твердості $\text{HV}_{0.05}$ зміцненої зони від напруженості електростатичного поля E

Аналіз отриманих даних показує, що чим більше вміст вуглецю й легуючих елементів в металі, тим менший вплив на твердість металу при імпульсному лазерному випромінюванні надає електростатичне поле.

Процес лазерного загартування відбувається в поверхневому шарі металу на глибину h . Для забезпечення впливу лазерного випромінювання на задану глибину з потрібною точністю необхідно забезпечити наявність прецизійної системи позиціонування оптики довгофокусного лазерного технологічного комплексу. Використовуючи високоточний фотоелектричний датчик кутового позиціонування оптичної системи можна забезпечити точне положення фокусу лазерного променя на поверхні деталі. До точності датчика пред'являються високі вимоги, що вимірюються десятками кутових секунд, що відповідає відхиленню плями на поверхні металу на десяті долі міліметра.

В інших дослідженнях впливу методу поверхневої лазерної обробки на показники зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин [338] проведено дослідницьку роботу з лазерного наплавлення матеріалів на ґрунтообробні знаряддя зі сталі 65Г, при цьому для просторового керування лазерним променем використовувався сканер. На поверхню дослідних зразків наносилася обмазка на водяній основі оксиетилцелюлози з порошком ФБХ6-2. Середня твердість матеріалу основи дослідних зразків становила 2200 МПа.

В результаті впливу на поверхню зразка № 1 лазерного променя потужністю 1400 Вт з частотою сканування 200–225 Гц був отриманий видозмінений шар, геометричні параметри якого визначаються зоною термічного впливу шириною 7 мм при глибині 1,1 мм, шириною легованого шару 4,5 мм. Глибина зони загартування із твердого стану становила 0,6 мм, а легованого шару – 0,3 мм. Також при цьому присутній невеликий шар наплавленого порошку товщиною 0,2–0,3 мм.

Для зразка № 2 геометричні параметри зони термічного впливу склали: ширина зони – 8,1 мм, ширина легованого шару – 5 мм, загальна глибина зон загартування, легування й наплавлення – 1,35 мм, у тому числі легованого шару – 0,5 мм і наплавленого шару 0,3–0,35 мм.

Результати дослідження їхньої мікротвердості наведені на рис. 4 [338]. У зразку № 2 мав місце більш глибокий перепад, тому швидкість охолодження матеріалу була нижча, що вплинуло на зменшення мікротвердості. У результаті обробки за першим режимом (зразок № 1) спостерігалась незначна зміна геометричних розмірів. Це важливо для практичної обробки деталей, оскільки при наплавленні ріжучої кромки ґрунтообробних знарядь геометрія робочої поверхні не повинна змінюватися.

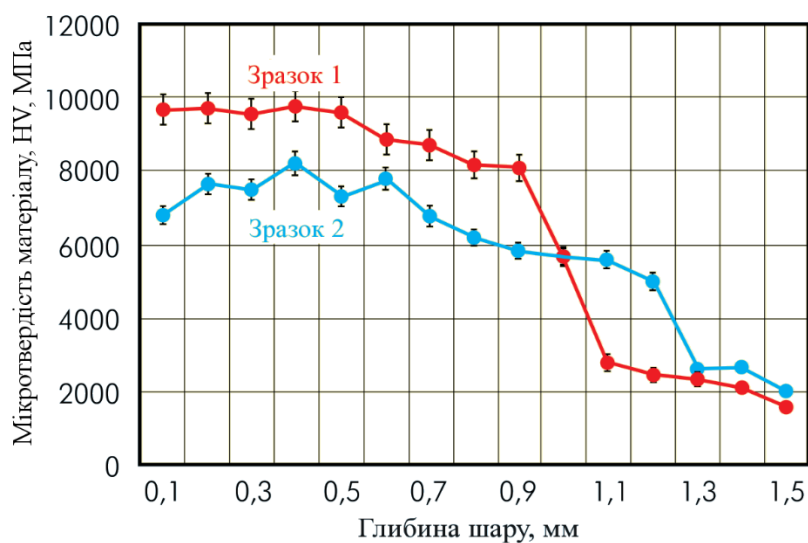


Рисунок 4. Залежність мікротвердості сталі від глибини зони лазерного впливу

Товщини шарів (наплавленого, легованого і загартованого), отриманих методом поверхневої лазерної обробки, достатні для зниження корозійного й абразивного зношування поверхні інструментів. У порівнянні із загартуванням зразків струмами високої частоти ці результати вищі в 3–5 разів, а в порівнянні з індукційним наплавленням такого ж порошку – вищі в 3–4 рази.

Крім цього, розроблено технологію зміцнення дисків для борін зі сталі 65Г [338], що включає в себе лазерне зміцнення та наплавлення. Відбувалось зміцнення зони шириною 15–16 мм, а ширина наплавленої зони становила 16–18 мм.

Випробування дослідних дисків разом із серійними відбувались в польових умовах. Величина лінійного зносу за висотою для дослідних дисків борін, зміцнених лазерним випромінюванням, зменшилась на 82% порівняно із

серійними дисками, а для дисків, зміцнених лазерним наплавленням, зменшилась на 70%. Дослідні диски у порівнянні із серійними мали менший знос за масою на 31%.

На твердість сталі, що різними авторами у своїх дослідженнях піддавалась лазерному зміцненню, також додатково впливають такі фактори, як тип лазерного технологічного комплексу, частота та час дії зміцнюючого лазерного випромінювання тощо.

Також існує методика, коли за один прохід у декілька разів збільшується ширина лазерної доріжки зміцнення при незмінній потужності лазера шляхом відмови від традиційної круглої форми фокальної плями і переходу до плями у формі вузької смужки, переміщеної перпендикулярно своїй довгій стороні [337]. Зміна форми фокальної плями призводить до зміни термічного циклу нагрівання і охолодження оброблюваного матеріалу. У випадку забезпечення рівності інтенсивностей і швидкостей переміщення джерел нагрівання по поверхні оброблюваної деталі час нагрівання і теплонасичення для джерела смужкової форми менші, а градієнт температури і швидкість охолодження вищі, ніж для джерела круглої форми і такої ж площі.

Використання динамічного фокусатора дозволяє у випадку обробки деталей, розміри яких більше довжини лазерної смужки, сформувати смужковий пучок із спеціальним неоднорідним розподілом інтенсивності за довжиною смужки, при якому інтенсивність до кінців смужки збільшується за певним законом. У цьому випадку обробка поверхні деталі повинна проводитись смугами впритул, без накладання.

У випадку застосування смужкового лазерного пучка у порівнянні з обробкою пучком круглої форми тієї ж потужності забезпечується при цілком достатній для практики глибині зміцненого шару 0,5–0,7 мм збільшення у 2–4 рази площі оброблюваної поверхні за одиницю часу (залежно від режиму обробки).

Застосовування динамічних фокусаторів смужкового випромінювання розширяє можливості використання методу лазерного зміцнення також і для

робочих органів ґрунтообробних машин, підвищуючи його продуктивність та конкурентоспроможність.

На ефективність процесу лазерного зміцнення також суттєво впливає вибір типу лазера. У випадку використання волоконних лазерів ефективність процесу зміцнення з урахуванням потужності випромінювання лазера, глибини гартування та швидкості руху виробу порівняно із ефективністю CO₂-лазера може збільшуватися у 12 раз [338], що також підвищує конкурентоспроможність даного методу.

Отже, сталь 65Г, що використовується вітчизняними виробниками робочих органів ґрунтообробних машин, може успішно піддаватись лазерному зміцненню та наплавленню, що забезпечить значне підвищення зносостійкості цих знарядь. Такі заходи, як додавання карбідів бора у сплави для наплавлення на сталь, додаткове застосування під час лазерного зміцнення електростатичного поля, використання волоконних лазерів та лазерного пучка смужкової форми дозволять ще більше підвищити рівень зносостійкості робочих органів відповідних машин та забезпечити ефективне впровадження методу поверхневої лазерної обробки у виробництво.

7.1.2 Використання лазерного зміцнення сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки

Метод поверхневої лазерної обробки може застосовуватися для різноманітних деталей сільськогосподарської техніки.

Багато деталей сільськогосподарської техніки, до яких висуваються відповідні вимоги щодо міцності та зносостійкості, виготовляються зі сталі 45. До них належать різноманітні деталі тракторів, комбайнів, засобів механізації тваринництва та інших сільськогосподарських машин, такі як колінчаті, розподільчі та шліцеві вали, складові кривошипно-шатунного механізму, шестерні, зубчаті колеса, зірочки, плунжери тощо.

Тому аналіз впливу методу поверхневої лазерної обробки на властивості сталі 45 з метою збільшення ресурсу виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки є актуальним та важливим.

Для детального дослідження впливу потужного лазерного випромінювання на поверхню сталі 45 потрібно мати чіткі уявлення про всі ті внутрішні процеси, що при цьому відбуваються.

Тому розглянемо особливості формування мікроструктури в зоні лазерного впливу (ЗЛВ) для сталі 45 [339]. У процесі лазерного термозміцнення даної сталі ступінь завершеності аустенітизації визначається максимальними температурами, до яких нагріваються ті чи інші зони, швидкостями нагрівання й охолодження, а також часом перебування при температурах вище A_{c1} . У верхніх шарах, нагрітих до температур плавлення й біясолідусних температур (зона оплавлення та верхня частина зони термічного впливу (ЗТВ)), відбувається повне перетворення надлишкового фериту в аустеніт і повне насичення колишніх феритних ділянок вуглецем. При цьому в процесі охолодження утворюється дрібнодисперсний мартенсит з рельєфними границями між пластинами, а в деяких випадках – з невеликою кількістю бейніту.

У нижніх шарах, нагрітих до більш низьких температур, насичення вуглецем колишніх феритних ділянок відбутися не встигає. Це призводить до зниження стійкості аустеніту, збільшення критичної швидкості охолодження, а при порівняно невисоких швидкостях охолодження металу цієї зони – утворення трооститної, трооститоферитної або феритної сіток.

При різних швидкостях обробки спостерігається деяка відмінність у формуванні термозміцненої зони. В основному це стосується зони гартування із твердого стану.

У випадку високої швидкості обробки дифузійний перерозподіл вуглецю між надлишковим феритом і перлітними колоніями вповільнюється. В результаті цього мартенсит, що утворюється на місці перлітних колоній, може мати концентрацію вуглецю, близьку до евтектоїдної. Частина цементитних пластин у перліті залишається нерозчиненою; біля них у збагачених вуглецем ділянках

утворюється мартенсит і деяка кількість аустеніту, а в центральній частині, де твердий розчин мало насичений вуглецем, – низьковуглецевий мартенсит.

Загальний вид ЗЛВ нормалізованої сталі 45 показаний на рис. 5. При режимах з високими швидкостями охолодження в зоні оплавлення та у верхній частині ЗТВ нормалізованої сталі 45 утворюється дрібнодисперсний мартенсит з рельєфними границями між пластинами (рис. 6, *а* та *б*). Очевидно, це рейковий мартенсит, можливо, з деякою кількістю бейніту. Мікротвердість зони оплавлення коливається в межах від 7000 до 8500 МПа, причому більш високі її значення спостерігаються в нижній частині зони, що можна пояснити більшою швидкістю охолодження. Зі збільшенням глибини ЗТВ неоднорідність структури зростає: спочатку утворюється мартенситотроостит (див. рис. 6, *б*), а потім – мартенсит і трооститна сітка, що переходить у трооститоферитну (рис. 6, *в*) і на границі з вихідною структурою – у феритну (рис. 6, *г*).

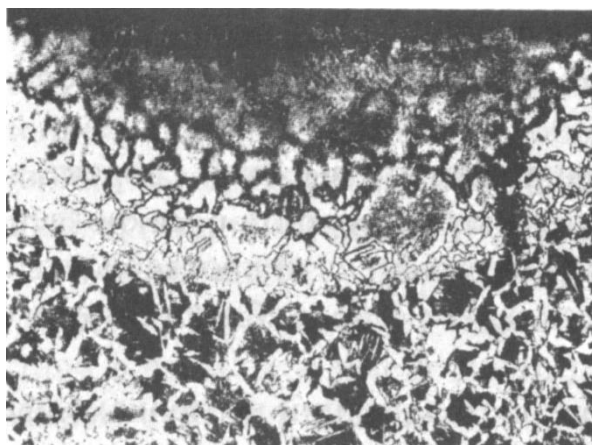


Рисунок 5. Загальний вигляд ЗЛВ нормалізованої сталі 45

При малій швидкості обробки під зоною оплавлення у верхній частині ЗТВ утворюється вузький шар однорідного мартенситу. У цьому шарі, нагрітому до високої температури, відбувається повне перетворення надлишкового фериту в аустеніт та повне насичення цих ділянок вуглецем. На більшій частині ЗТВ формується відносно однорідна мартенситна структура. Для нормалізованої сталі 45 у верхніх шарах ЗТВ із мікротвердістю $H_{50} = 7300 \pm 200$ МПа довжина пластин мартенситу більша, чим у середніх. У середині ЗТВ мікротвердість

знижується до 5320 МПа , що може бути обумовлено наявністю трооститу. У нижній частині ЗТВ існує область, у якій поруч із мартенситом є сітки трооститу, трооститофериту та фериту. Мікротвердість мартенситу в області трооститної сітки $H_{50} = 7520 \text{ МПа}$, а в області феритної – 6440 МПа . Це свідчить про меншу насиченість твердого розчину при аустенізації.

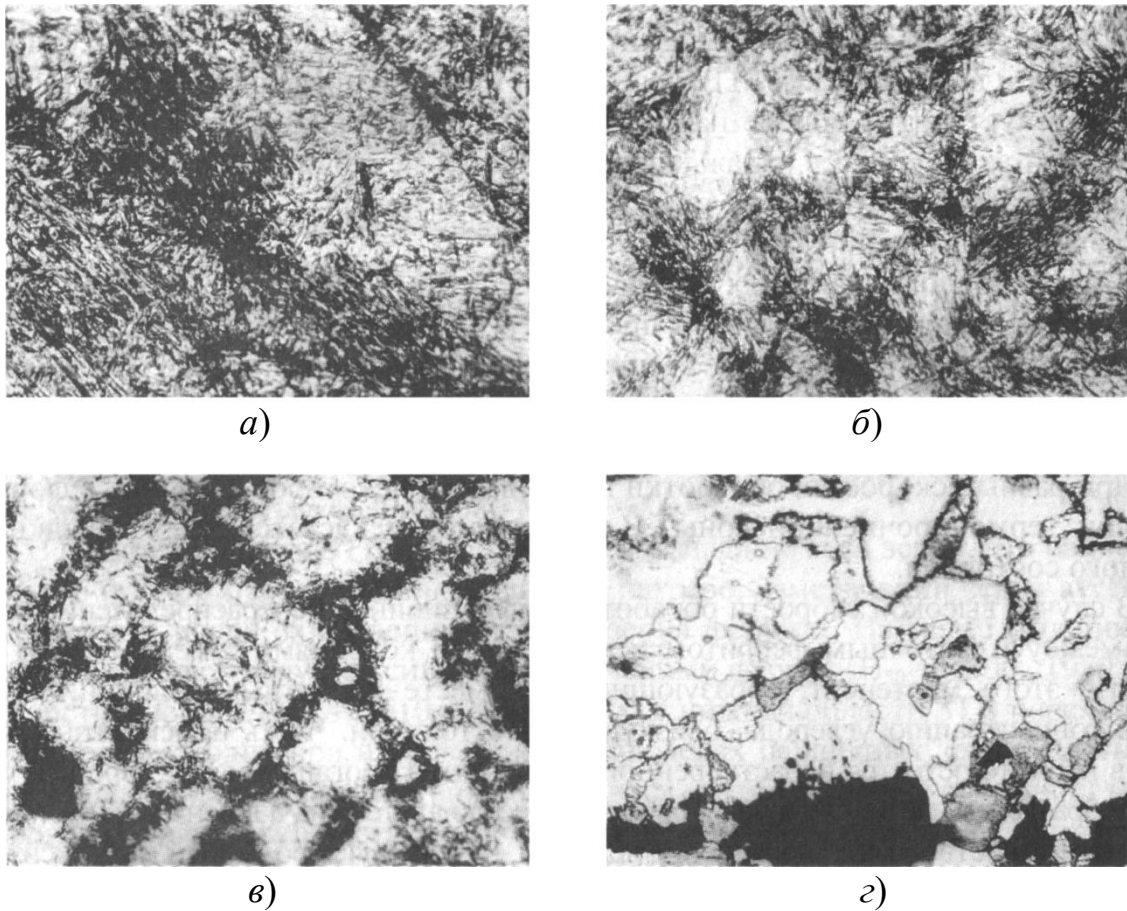


Рисунок 6. Мікроструктура різних шарів ЗЛВ нормалізованої сталі 45 (x400):

a – зона оплавлення; *б* – верхня частина ЗТВ; *в* – середина ЗТВ;
з – нижня частина ЗТВ

При виборі режимів лазерної обробки сталі 45 необхідно враховувати зазначені закономірності формування структури ЗЛВ.

Так як після гартування сталі твердість мартенситу різко зростає, то для реалізації цього процесу доцільно використовувати безперервне лазерне випромінювання та здійснювати зміцнення при невисоких швидкостях.

Слід враховувати, що при лазерній обробці нормалізованої або відпаленої сталі без оплавлення з підвищеними швидкостями або при імпульсному гартуванні область однорідного мартенситу відсутня і трооститоферитна сітка навколо мартенситу може досягати поверхні зразка, що призводить до зниження загальної твердості ЗЛВ.

Необхідно мати на увазі, що при лазерному гартуванні сталі після її поліпшення, тобто після гартування та високого відпуску, область однорідного мартенситу збільшується.

У процесі застосування поверхневого лазерного зміцнення з оплавленням поверхні твердість двох перших шарів зони нагріву сталі збільшується з ростом вмісту вуглецю в сталі (рис. 7) [336]. Причиною цього є збільшення ступеня тетрагональності мартенситу в сталі 45 щодо сталі 20.

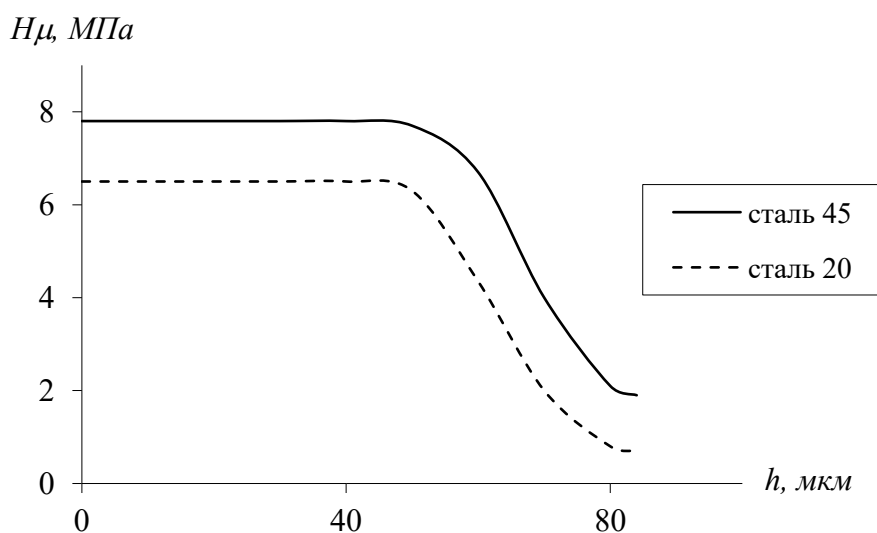


Рисунок 7. Твердість зон нагріву на вуглецевих сталях

Відомо, що під час лазерного зміцнення деталей сільськогосподарської техніки важливим фактором впливу на їх ресурс виробітку є глибина зміцненого шару, яка залежить від параметрів поверхневої лазерної обробки, нанесених на зміцнювану поверхню поглинаючих покриттів тощо. Зокрема, глибина ЗЛВ зростає при збільшенні потужності лазерного випромінювання під час зміцнення сталі 45 (рис. 8) [339].

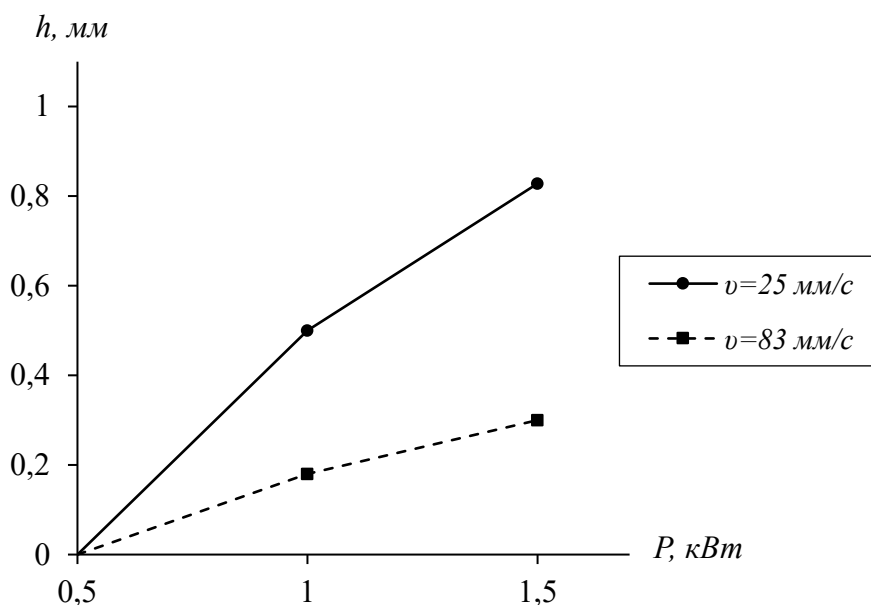


Рисунок 8. Залежність глибини ЗЛВ сталі 45 від потужності
лазерного випромінювання

Значення глибини ЗЛВ на полірованому зразку зі сталі 45 при використанні різних поглинаючих покриттів зображені на рис. 9 [339]. Слід зазначити, що ефективність застосування поглинаючих покриттів та в цілому лазерного зміцнення залежить також від швидкості обробки, що визначає час впливу лазерного випромінювання та температуру відповідної поверхні. При збільшенні швидкості лазерної обробки ($v > 6$ мм/с) оплавлення поверхні дослідного зразка не відбувається. Найкращі результати мають місце у випадку застосування покриттів, що містять оксиди алюмінію та цинку, а також сажу у вигляді аерозолі (криві 1-4). При цьому відбувається значне збільшення глибини ЗЛВ.

Також лазерне гартування сталі 45 при використанні даних поглинаючих покриттів може успішно використовуватись і при вищих швидкостях обробки, але при цьому відбувається значне зменшення глибини зміцненого шару (рис. 10) [339].

Безумовно, розглянуті вище приклади лазерного гартування сталі 45 при використанні різних поглинаючих покриттів не охоплюють всіх можливих випадків. Питання розробки нових, більш ефективних, дешевих та технологічних

покриттів для лазерної поверхневої обробки сталі не можна вважати вирішеним, необхідно й надалі продовжувати дослідження в даному напрямку.

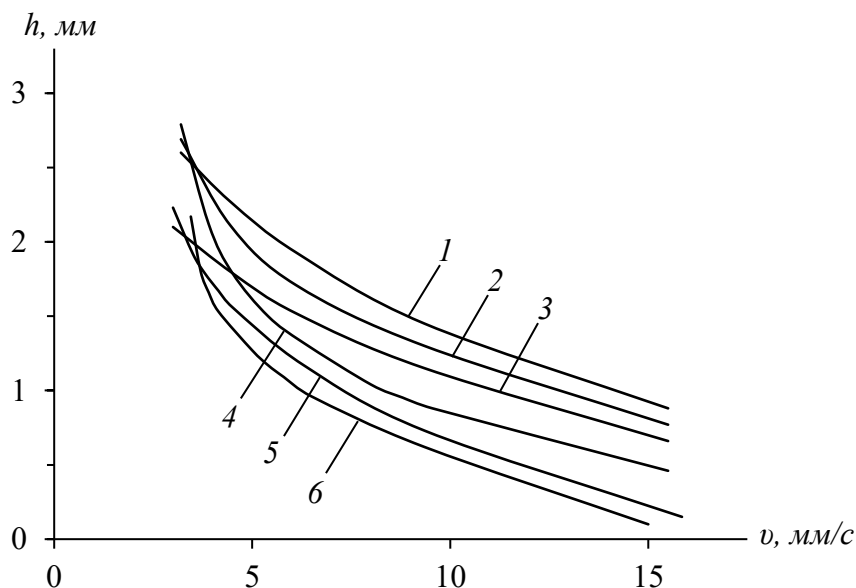


Рисунок 9. Зміна глибини ЗЛВ на полірованій сталі 45 при дослідженні різних поглинаючих покриттів ($E \cong 20 \text{ MBm/m}^2$): 1 – аерозольна сажа; 2 – Al_2O_3 з органічним сполучником; 3 – водяний розчин ZnO ; 4 – ZnO з органічним сполучником; 5 – водяний розчин сажі; 6 – розчин графіту в ацетоні

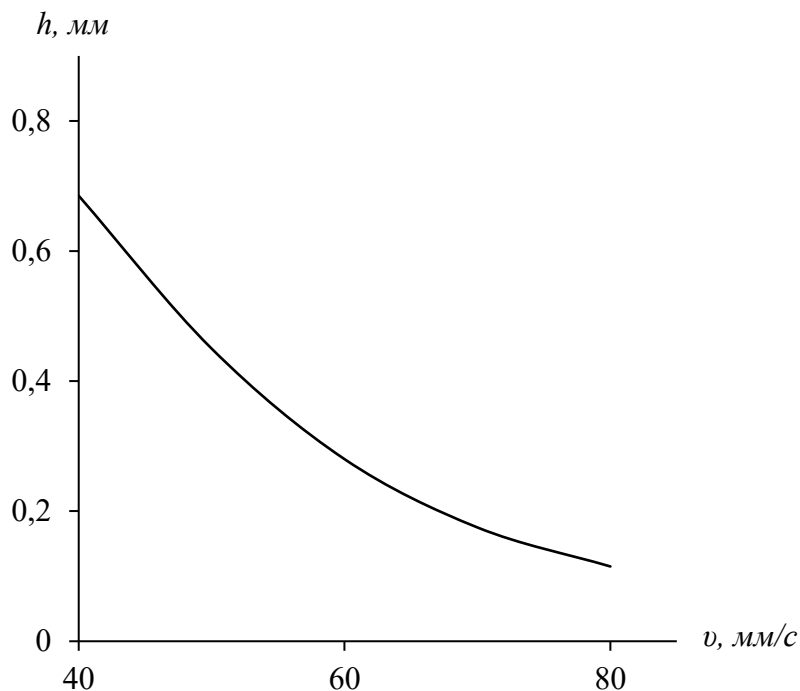


Рисунок 10. Залежність глибини ЗЛВ сталі 45 від швидкості обробки ($P=3,1$ кВт, поглинаюче покриття – аерозольна сажа)

Для вибору режиму обробки методом поверхневого лазерного впливу використовується вуглецевий еквівалент, який впливає на мікротвердість оброблюваного зразка та визначається в залежності від масової частки в ньому таких елементів, як C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo [339].

Використання лазерного гартування дозволяє також підвищити зносостійкість пар тертя сільськогосподарської техніки, що працюють як в умовах сухого тертя, так і в абразивно-масляному середовищі [339]. Зменшення зношування деталей після лазерного гартування обумовлене рядом факторів: великою твердістю поверхні, високою дисперсністю структури, збільшеними несучими властивостями поверхні, зменшеним коефіцієнтом тертя тощо.

Поряд із цим на зносостійкість впливає нерівномірність властивостей локальних ділянок обробленої поверхні. Зміцнення з перекриттям, а також нанесення окремих плям або доріжок лазерного зміцнення призводить до утворення знеміцнених та незміцнених ділянок у місцях, де метал опромінювався два та більше разів або зовсім не опромінювався. Ці ділянки можуть бути місцями релаксації залишкових структурних та термічних напружень. Крім того, часткове випаровування матеріалу в ЗЛВ викликає утворення мікрозаглиблень, в яких утримується мастило. Це також сприяє збільшенню зносостійкості при роботі пар тертя.

В умовах тертя ковзання сталі 45, загартованої лазерним безперервним випромінюванням без оплавлення, по загартованій і низьковідпущеній сталі ШХ15 зношування й коефіцієнт тертя суттєво знижуються в порівнянні зі звичайним гартуванням сталі 45. Також після застосування методу поверхневої лазерної обробки різко зменшується час припрацювання пар тертя (рис. 11).

Зносостійкість в умовах тертя зі змащенням також підвищується в порівнянні з іншими видами термозміцнення. Після лазерного гартування сталі 45 інтенсивність зносу в 2-3 рази менша, чим після нормалізації та на 7...37 % менша, чим після гартування струмами високої частоти (рис. 12).

При переході від обробки з оплавленням поверхні до обробки без оплавлення інтенсивність зношування різко зменшується.

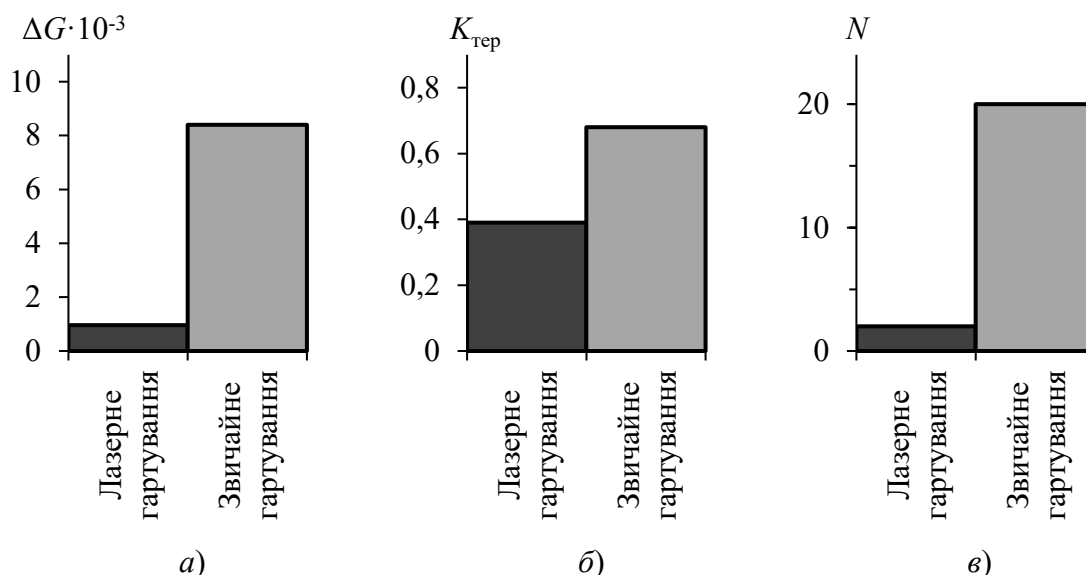


Рисунок 11. Порівняння відносного зносу (а), коефіцієнту тертя (б) та числа циклів до припрацювання пар тертя (в) для звичайного та лазерного гартування сталі 45 ($P=1 \text{ кВт}$, $v=25 \text{ мм/с}$)

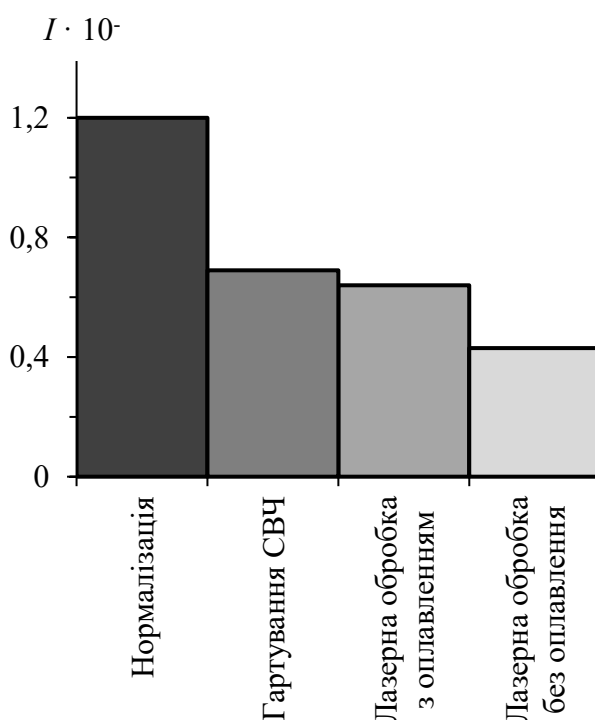


Рисунок 12. Інтенсивність зносу сталі 45 в умовах тертя зі змащенням (контактний тиск – 10 МПа , число циклів випробування – $2,1 \cdot 10^5$)

Отже, сталь 45, що використовується вітчизняними виробниками деталей сільськогосподарських машин, може вже зараз успішно піддаватись лазерному зміцненню на виробництві, що забезпечить значне підвищення їх зносостійкості та міцності. Також існує потреба у подальших широкомасштабних дослідженнях

з метою розробки широкої номенклатури конкретних технологій лазерного зміцнення різних деталей сільськогосподарської техніки.

7.1.3 Аналіз залишкових напружень в результаті лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки із залізвуглецевих сплавів

Лазерна обробка може забезпечити значне підвищення міцності, а при правильному виборі марки сплаву, режимів застосування лазерного випромінювання та подальшій обробці зміцнених зразків – ще й підвищення пластичності, ударної в'язкості та зносостійкості матеріалу відповідних деталей сільськогосподарської техніки із залізвуглецевих сплавів [340-347].

Дані характеристики сплавів безпосередньо пов'язані, зокрема, також із залишковими напруженнями на їх поверхні внаслідок лазерної обробки.

Якщо розглянути поперечний переріз зміцненої лазерним випромінюванням смуги залізвуглецевих сплавів за допомогою CO₂-лазеру безперервної дії, то в ньому можна виділити декілька основних зон (рис. 13) [346]: зону оплавлення (зону загартування з рідкого стану), зону загартування, зону відпуску та вихідну структуру матеріалу. У ряді окремих випадків деякі з цих зон можуть бути відсутніми (наприклад, може бути відсутньою зона оплавлення при загартуванні без оплавлення поверхні або зона відпуску при загартуванні попередньо відпаленого металу). Характерний зовнішній вигляд зміцнених доріжок без оплавлення і з оплавленням поверхні наведено на рис. 14.

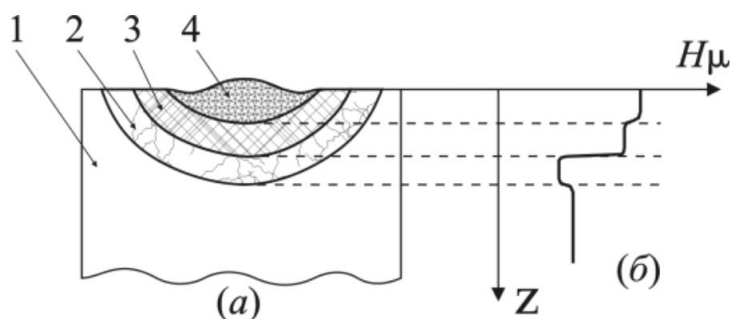


Рисунок 13. Схема поперечного перерізу зони лазерної обробки (а) і розподілу мікротвердості за глибиною зони обробки (б):

1 - вихідний метал, 2 - зона відпуску, 3 - зона загартування,
4 - зона загартування з рідкого стану.

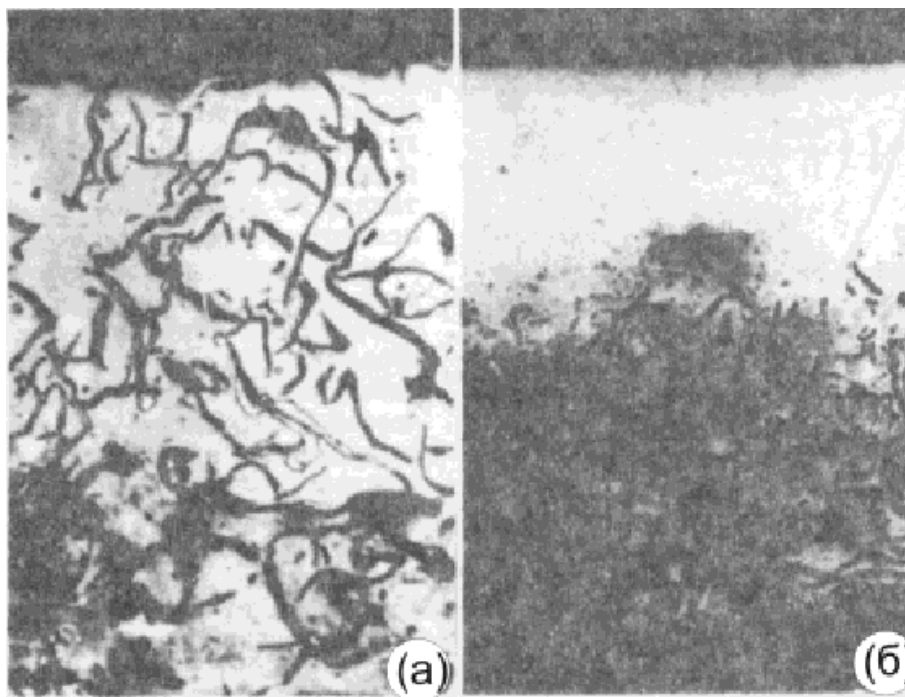


Рисунок 14. Структура загартованих зон після лазерної обробки зразків з сірого перлітного чавуну випромінюванням CO_2 -лазера:
(а) - загартування без оплавлення (x50); (б) - загартування з оплавленням (x25).

Кожна зона в свою чергу може складатися із декількох шарів та мати за своїм перерізом відмінності в мікроструктурі, елементному складі, співвідношенні складових своїх фаз тощо. У сталях типовим є дендритна будова зони оплавлення, причому дендрити ростуть перпендикулярно межі поділу в напрямку відводу тепла в тіло зразка. Карбіди при цьому зазвичай розчиняються, і основною структурною складовою є мартенсит.

При оплавленні чавунів графіт розчиняється в розплаві, і після кристалізації формується дрібнодисперсна структура білого чавуну. Ступінь розчинення графіту залежить від його виду (пластинчастий, кульовий) і від тривалості термічного циклу. Виділення газів, адсорбованих графітом, часто призводить до утворення пор (як це видно на рис. 14,б). Поширеними дефектами є також тріщини.

Зони загартування сталі в твердому стані неоднорідні за перерізом. Як і впливає із загальних положень, в глибині поряд з мартенситом є елементи вихідної структури: ферит (для доєвтектоїдної сталі) і цементит (для заєвтектоїдної сталі), а ближче до поверхні після охолодження гомогенізованого

аустеніту формується мартенсит і залишковий аустеніт. Перекристалізація супроводжується подрібненням зерна і гомогенізацією аустеніту, особливо якщо проводити її протягом достатнього часу без сильного перегріву, тобто з витримкою при температурі вище T_a . Розчинення надлишкового цементиту при перегріві заевтектоїдних сталей призводить до підвищення частки залишкового аустеніту і до зниження мікротвердості в порівнянні із зоною оптимального нагріву, що містить поряд з мартенситом нерозчинені карбіди.

При лазерному загартуванні без оплавлення фазові перетворення в матриці чавунів пов'язані з її структурою та зі ступенем насиченості її вуглецем. Найбільше матриця насичується вуглецем поблизу скупчень графіту, особливо якщо вони мають розвинену поверхню і достатньо довгий час нагрівання. Мікротвердість в зоні загартування зважаючи на велику неоднорідність структури відрізняється великим діапазоном значень (від 3000 до 9000 МПа), причому в феритних чавунах мікротвердість завжди менше, ніж в перлітних.

Ступінь загартування в першу чергу характеризується твердістю матеріалу. Кожна зона обробленої лазерним випромінюванням смуги має свою мікротвердість, і, як правило, розподіл мікротвердості за глибиною матеріалу має вигляд, зображений на рис. 13,б.

При лазерній обробці сплавів спостерігається велика нерівномірність розподілу температури, що призводить до значної структурної неоднорідності за товщиною та шириною ЗЛВ. Це може викликати значну неоднорідність розподілу залишкових напружень та призвести до деформації виробів.

В основному аналізувалися залишкові напруження, що діють в поперечному напрямку - σ_y . Перевірка показала, що характер розподілу поздовжніх напружень σ_x аналогічний.

На рис. 15 представлені криві розподілу залишкових напружень σ_y в технічному залізі на різній відстані від центру зміцненої смуги в залежності від потужності лазерного випромінювання [346]. Як впливає з отриманих результатів, на поверхні зразків, оброблених випромінюванням CO₂-лазера безперервної дії, спостерігається неоднорідний розподіл залишкових

макронапружень, причому є певна симетричність щодо центру смуги. При потужності випромінювання $P_0 = 0,9$ і $1,3$ кВт (обробка без оплавлення поверхні) в центрі смуги виникають незначні розтягувальні напруження $\sigma_y \sim 70$ Н/мм². На межі з неопроміненою поверхнею ЗЛВ по обидві її сторони розтягувальні напруження зростають до $170...270$ Н/мм², а при віддаленні від центру смуги в неопромінену шліфовану поверхню напруження плавно знижуються до $\sigma_y = -50...-70$ Н/мм². Перехід до лазерної обробки з оплавленням поверхні змінює вид розподілу залишкових напружень. На поверхні оплавленого металу в центрі смуги напруження знижуються до нуля при $P_0 = 3$ кВт і до $\sigma_y = -90$ Н/мм² при $P_0 = 2$ кВт, а на межі вони збільшуються до $240...290$ Н/мм². Крім того, при підвищенні потужності разом зі збільшенням ширини зміцненої смуги область розтягувальних напружень віддаляється від центру смуги на більшу відстань.

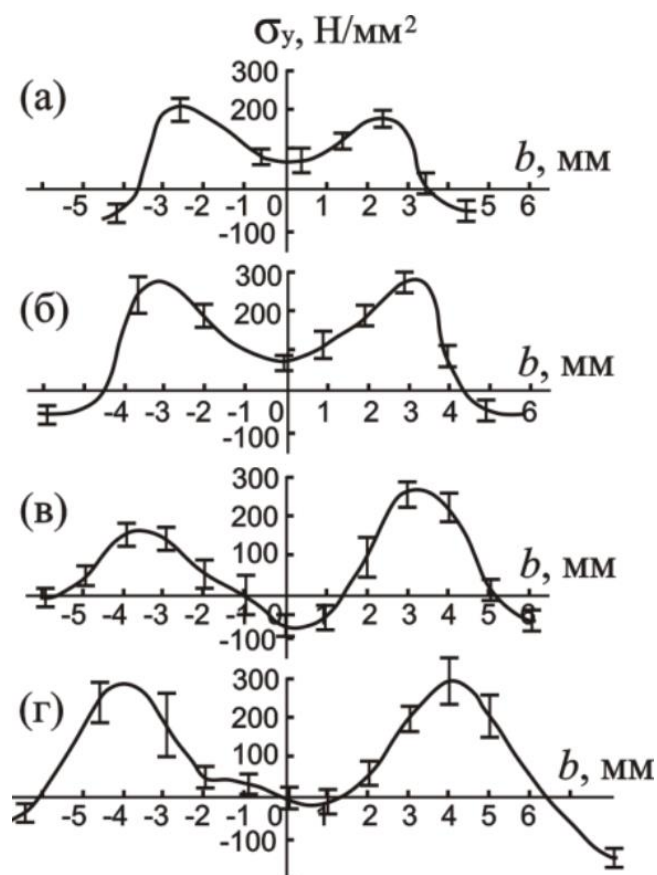


Рисунок 15. Розподіл залишкових напружень σ_y на поверхні технічного заліза в залежності від відстані від центру смуги при обробці зі швидкістю $v = 2$ м/хв і різною потужністю:

(а) - 0,9 кВт; (б) - 1,3 кВт; (в) - 2 кВт; (г) - 3 кВт.

При лазерній обробці залізовуглецевих сплавів на стадії охолодження взаємодія стискувального об'єму металу в ЗЛВ з холодним неопроміненим об'ємом призводить до формування в ЗЛВ розтягувальних напружень, а взаємодія розтягувального об'єму мартенситу з вихідною структурою - стискувальних напружень.

Аналіз результатів дослідження показав, що при підвищенні потужності випромінювання змінюється не тільки величина напружень в центрі смуги, а й характер їх розподілу в поперечному напрямку.

Величина і знак залишкових напружень на поверхні зміцнених лазером смуг залежать від співвідношення об'ємних змін, обумовлених тепловим впливом і структурними перетвореннями. Утворення в процесі охолодження досить насиченого вуглецем мартенситу призводить до формування в центрі смуги сталей 45, 40Х та інших стискувальних залишкових напружень. Зменшення вмісту вуглецю в мартенситі призводить до зменшення об'ємного ефекту при охолодженні та частки стискувальних напружень на поверхні.

Використання сканування лазерного випромінювання поперек руху з частотою в декілька сотень герц дозволяє створити необхідний розподіл щільності потужності на оброблюваній поверхні, збільшити геометричні розміри зміцнених смуг, підвищити однорідність структури в них. Разом з тим після лазерного гартування широкими смугами на велику глибину через значні внутрішні залишкові напруження недостатньо масивні і жорсткі вироби істотно деформуються та виникає потреба вживання спеціальних заходів для ліквідації залишкових напружень.

На поверхні деталей, зміцнених безперервним або імпульсним лазерним випромінюванням, виникають неоднорідно розподілені залишкові напруження. Розміри області зі зміненими напруженнями значно більші, ніж зона лазерного впливу, причому має місце певна симетрія відносно центру зміцненої смуги чи плями. Величина та знак залишкових напружень залежать від режимів лазерної обробки, хімічного складу сталі та деяких інших факторів. Вони визначають такі

властивості деталей, як зносостійкість, втомні характеристики, залишкові деформації тощо.

При формуванні напружень в термозміцненому шарі відбуваються два конкуруючі процеси. З одного боку, розвиваються розтягувальні напруження, викликані пластичною деформацією в процесі утрудненої усадки нагрітих областей $\sigma_{\text{терм}}$. З іншого боку, утворення мартенситу супроводжується збільшенням об'єму зазнавшої перетворень області, що, в свою чергу, сприяє виникненню стискувальних напружень $\sigma_{\text{фаз}}$. Величина і знак залишкових напружень $\sigma_{\text{зал}}$ залежать від співвідношення термічних $\sigma_{\text{терм}}$ та фазових $\sigma_{\text{фаз}}$ напружень. При $\sigma_{\text{терм}} > \sigma_{\text{фаз}}$ на поверхні формуються розтягувальні напруження, а при $\sigma_{\text{терм}} < \sigma_{\text{фаз}}$ – стискувальні.

Якщо після зміцнення відбулось мартенситне перетворення (це може бути обробка без оплавлення або з невеликим оплавленням), то в центрі смуги формуються стискувальні напруження. Збільшення об'ємного ефекту при мартенситному перетворенні за рахунок підвищення концентрації вуглецю або швидкості охолодження в сталях призводить до зростання частки стискувальних напружень.

При обробці поверхні сталі 45 безперервним CO₂-лазером потужністю 0,5 кВт зі швидкістю 33 мм/с збільшення твердості в опроміненій смузі не спостерігається, так як в процесі обробки нагрів відбувається при температурі нижче температури фазових перетворень. При цьому на поверхні в опроміненій смузі мають місце залишкові розтягувальні напруження $\sigma_{\text{зал}} = 250 \dots 430$ МПа, обумовлені пластичними деформаціями внаслідок нерівномірного нагрівання та охолодження під час обробки. При збільшенні потужності лазерного випромінювання метал в зоні обробки нагрівається до температур вище температури фазових перетворень (до оплавлення), на стадії охолодження відбувається мартенситне перетворення, що викликає збільшення об'єму та виникнення залишкових стискувальних напружень.

У центрі оплавленої лазером смуги сталі 45 абсолютні значення стискувальних напружень знаходяться в діапазоні 110...280 МПа (рис. 16) [347].

Найбільші стискувальні напруження зафіксовані при $P = 1$ кВт, коли обсяг рідкої складової мінімальний та швидкість її охолодження максимальна. При $P = 2...3$ кВт на поверхні сталі 45 стискувальні напруження $\sigma_{\text{зал}}$ мають абсолютні значення на 50...100 МПа більше, ніж на поверхні заліза, що пояснюється впливом вуглецю.

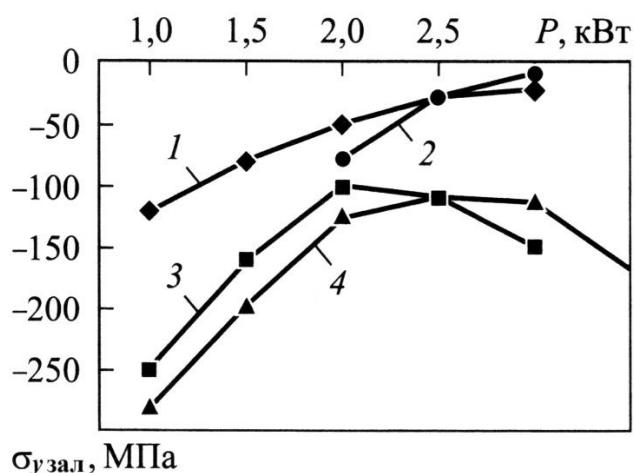


Рисунок 16. Зміна залишкових напружень в центрі зміцненої смуги в залежності від потужності випромінювання для різних залізовуглецевих сплавів:

1 – сталь У8; 2 – залізо; 3 – сталь 40Х; 4 – сталь 45

Значний вплив на розподіл залишкових напружень при термозміцненні чинить швидкість обробки. При малій швидкості обробки (8 мм/с) в центрі оплавленої смуги сталі 45 формуються розтягувальні напруження $\sigma_{\text{зал}} = 130$ МПа, а при збільшенні швидкості обробки напруження в центрі смуги переходять із розтягувальних в стискувальні (рис. 17) [347].

При обробці з перекриттям плям або смуг величина, знак та характер розподілу залишкових напружень значно змінюються. Розподіл залишкових напружень поперек термозміцнених смуг на нормалізованій сталі 45 при різних значеннях коефіцієнта перекриття смуг $K_{\text{п}} = (b - S) / b$ представлено на рис. 18 [347]. Початок координат вибрано на краю останньої смуги. При обробці без перекриття смуг ($K_{\text{п}} = -0,8; -0,3$) на їх поверхні є стискувальні напруження, а між смугами – розтягувальні.

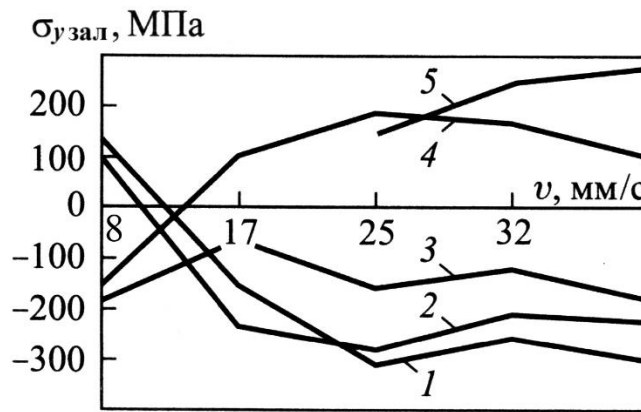


Рисунок 17. Зміна залишкових напружень в центрі зміцненої смуги в залежності від швидкості обробки при $P = 1$ кВт:
1 – сталь 45; 2 – 40X; 3 – У8; 4 – ХВГ; 5 – P18

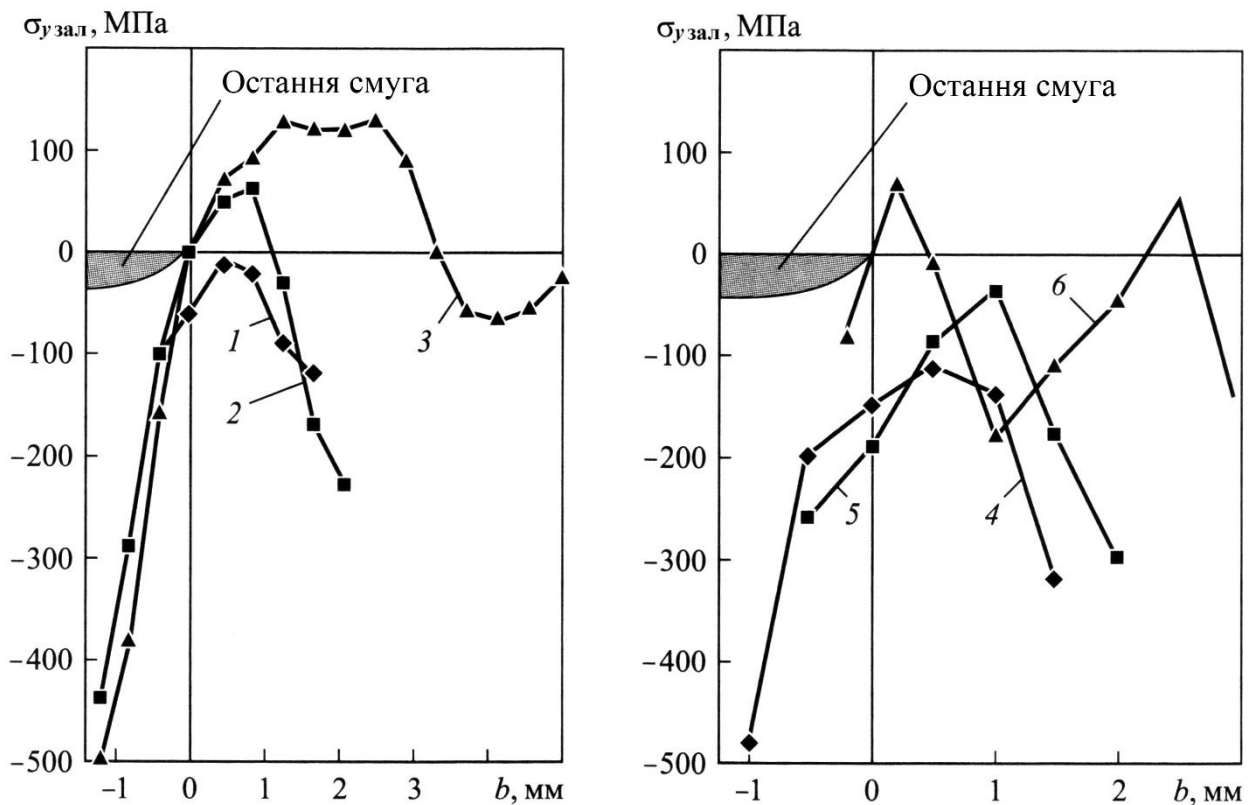


Рисунок 18. Розподіл залишкових напружень поперек термозміцнених смуг після обробки сталі 45 при різних коефіцієнтах перекриття $K_{\text{п}}$:
1 – -0,1; 2 – -0,3; 3 – -0,8; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,6

При $K_{\text{п}} = -0,1 \dots 0,1$, коли остання смуга надає термічний вплив на попередню смугу, між ними формуються стискувальні напруження. В цьому випадку остання смуга надає термічний вплив на зону неповного гарту попередньої смуги, де є структура мартенситу з троостито-феритною сіткою. У процесі такого впливу в результаті дифузії відбувається насичення деяких

ділянок твердого розчину вуглецем, крім того, можливий розпад залишкового аустеніту. Перетворення такого типу, мабуть, і призводять до формування стискувальних напружень.

Зі зростанням коефіцієнта перекриття до $K_n = 0,2$, коли остання смуга впливає на зону з мартенситною структурою попередньої смуги, напруження в області перекриття збільшуються.

Таким чином, величина і діапазон зміни напружень при обробці з перекриттям залежать від режимів обробки та перш за все від ступеня перекриття і потужності випромінювання. З підвищенням ступеня перекриття діапазон зміни напружень на поверхні зменшується.

Порівняно зі звичайним гартуванням та з гартуванням із відпуском лазерне гартування забезпечує в декілька разів меншу інтенсивність зносу внаслідок особливостей залишкових напружень у поверхневому шарі сталі [347] (рис. 19).

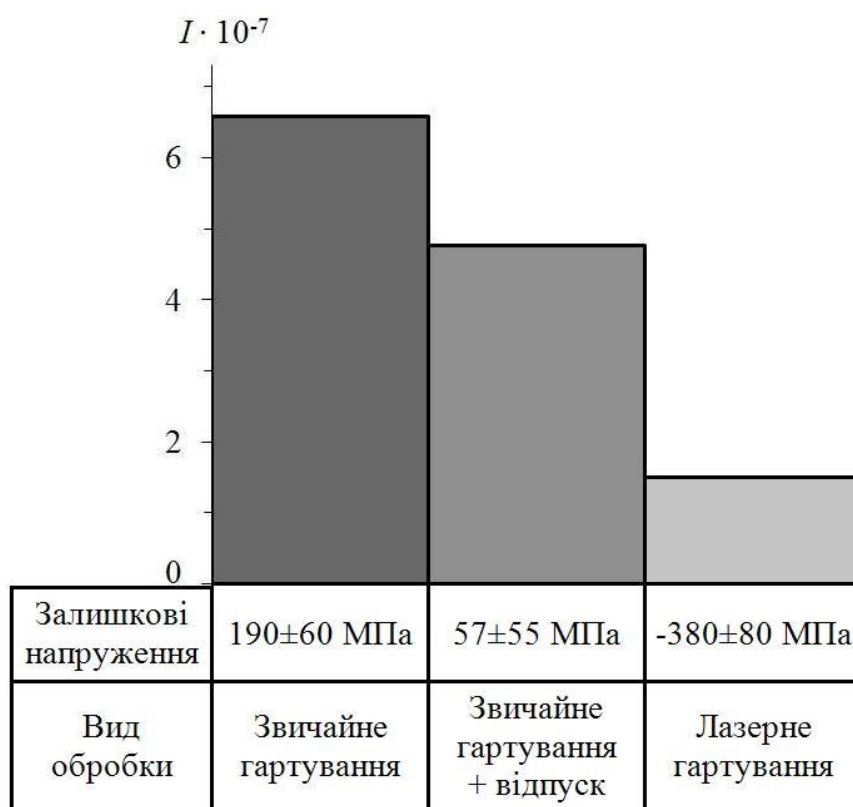


Рисунок 19. Інтенсивність зносу сталі 45 при сухому терті в залежності від максимальних залишкових напружень у поверхневому шарі термозміцненого зразка

Отже, врахування поверхневих залишкових напружень у зміцнюваних лазерним випромінюванням деталях сільськогосподарської техніки може збільшити ефективність обробки та забезпечити значне підвищення експлуатаційних характеристик відповідних виробів.

7.1.4 Лазерна обробка деталей сільськогосподарської техніки з чавуну

З чавуну виготовляється значна частина деталей тракторів, комбайнів та сільськогосподарських машин. Зокрема, з даного сплаву можуть виготовлятися такі елементи двигунів, як блоки циліндрів та їх головки і гільзи, втулки та днища кришок циліндрів, поршні та поршневі кільця, шатуни, випускні колектори та інші. Також з чавуну можуть виготовлятися колінчасті й розподільні вали, різноманітні махові та зубчасті колеса, шківни, корпуси редукторів, насосів та підшипників, опорні ролики, тормозні диски, корпуси електродвигунів, кронштейни, шестерні та інші деталі.

Для ефективного зміцнення різноманітних деталей також може застосовуватися метод поверхневої лазерної обробки [348-360].

Тому аналіз впливу лазерного випромінювання на поверхню чавуну, що в свою чергу впливатиме на ресурс виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки, на даний момент є актуальним та важливим.

Чавун характеризується всіма традиційними для нього якостями та має високі показники міцності на стиск, втомної міцності та зносостійкості завдяки вмісту у своєму складі великої кількості вуглецю, не менше 2,14%. Також чавун має гарні ливарні властивості та піддається механічній обробці.

Метод поверхневої лазерної обробки дозволяє забезпечити завдяки великому вмісту вуглецю в чавуні високі значення його міцності та при правильно підібраній технології лазерної обробки ще й достатньо високі значення зносостійкості. Актуальним є дослідження впливу лазерного випромінювання на поверхню чавуну, аналіз стану ЗТВ з метою збільшення ресурсу виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

Більшість виконаних різними авторами досліджень здійснювались із використанням широко вивчених твердотільних та CO₂-лазерів. До числа явних недоліків цих лазерів можна віднести низький ККД променя в зоні обробки, застосування для доставки променя в зону обробки складних оптичних систем, низьку щільність потужності обробки, а також велику площу контакту в зоні обробки. Сучасні оптоволоконні лазери цих недоліків позбавлені.

Можливість забезпечення зміцнення локальної зони оброблюваного зразка є незаперечною перевагою лазерної обробки. Однак локальність впливу лазерного випромінювання є як перевагою лазерної обробки, так і її недоліком. Якщо потрібно забезпечити зміцнення досить великої області, обробку лазером здійснюють з перекриттям. При цьому дуже важливо забезпечити необхідні характеристики зон перекриття.

Обробка зразків здійснювалась за допомогою оптоволоконного ітербієвого лазера в режимі безперервної дії з частковим розплавленням поверхні при заданій щільності потужності випромінювання E і фіксованому коефіцієнті перекриття. Досліджувався вплив лазерного випромінювання на мікроструктуру і властивості зон перекриття області обробки [349]. Схема лазерної обробки з необхідним перекриттям зображена на рис. 20.

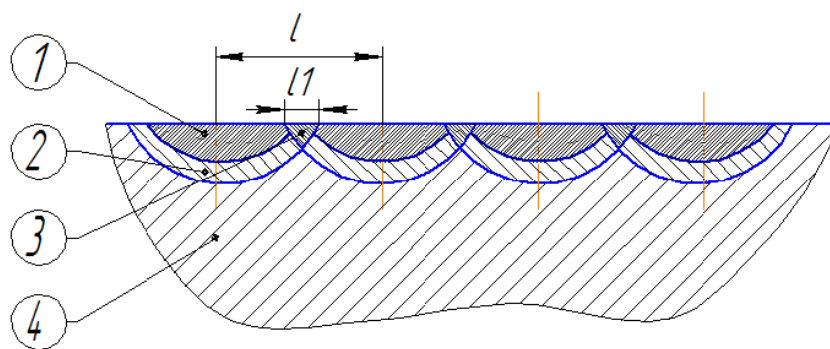


Рисунок 20. Схема лазерного зміцнення з перекриттям: 1 - зона розплавлення;
2 - ЗТВ; 3 - зона перекриття; 4 - основний матеріал

На рис. 21 показано поперечні перерізи зони лазерної обробки чавуну СЧ21. Поперечний переріз перехідних зон даного сплаву зображений на рис. 22.

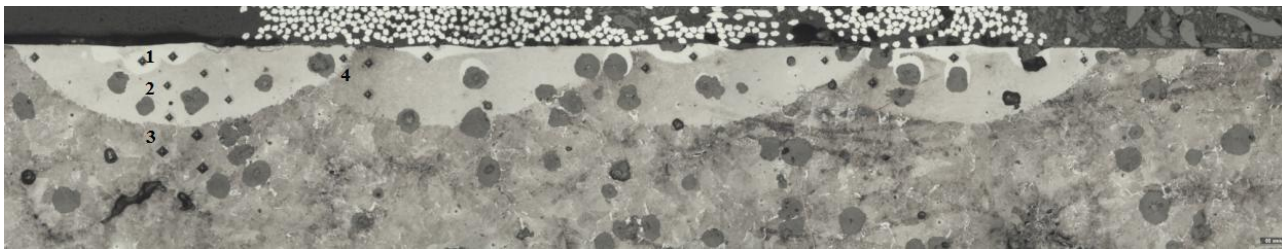


Рисунок 21. Поперечний переріз зони лазерної обробки чавуну СЧ21
($E=4,5 \cdot 10^3$ Вт/см², покриття 10%): 1 - зона розплавлення; 2 - ЗТВ;
3 - основна структура; 4 - перехідна зона

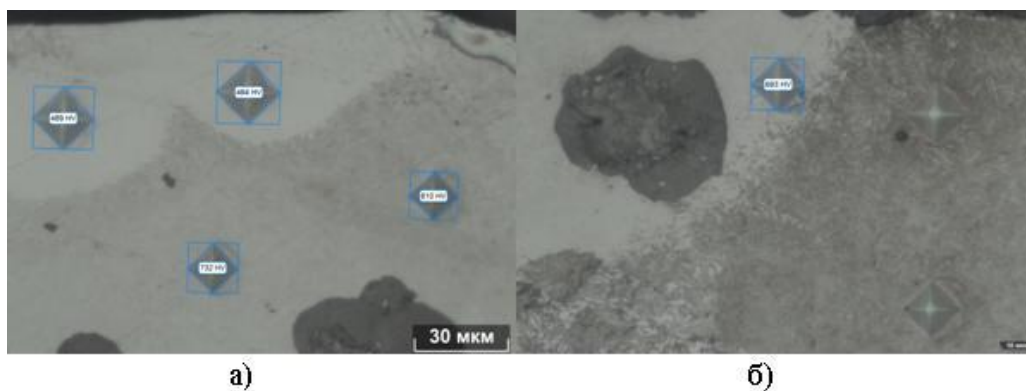


Рисунок 22. Поперечний переріз перехідних зон зразка чавуну СЧ21:
а) в безпосередній близькості до зони оплавлення; б) місце стику двох
оброблюваних ділянок

Із наведених вище рисунків видно, що частка оплавленої зони чавуну СЧ21 є невеликою та складається з ледебуриту. Зона термічного впливу являє собою рейковий мартенсит з невеликою кількістю залишкового аустеніту і має мікротвердість до 930 Нв. Зони покриття мають таку ж структуру, як у зон термічного впливу та однакову з ними мікротвердість.

Порівняємо результати лазерної обробки чавуну СЧ21 та сталі Х12МФ за однакових умов. На рис. 23 зображено отримані в ході вимірювань значення мікротвердості даних сплавів на різних глибинах зразків, а на рис. 24 показано мікротвердість чавуну та сталі уздовж поверхні [349].

Чавун у порівнянні зі сталлю в результаті лазерної обробки має значно вищі показники міцності та за умови подальшої спеціальної обробки також матиме гарні показники зносостійкості.

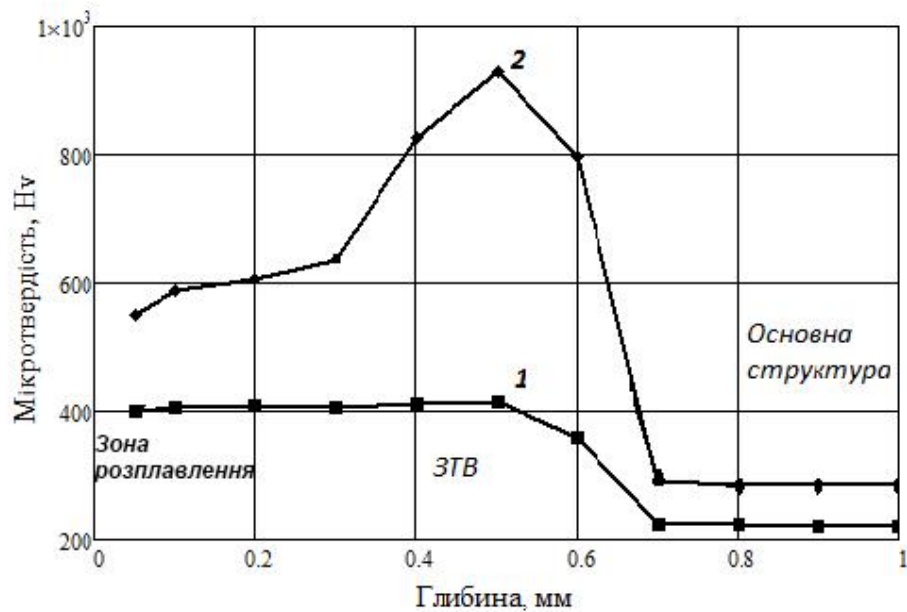


Рисунок 23. Мікротвердість зразка за глибиною: 1 – X12МФ; 2 – СЧ21

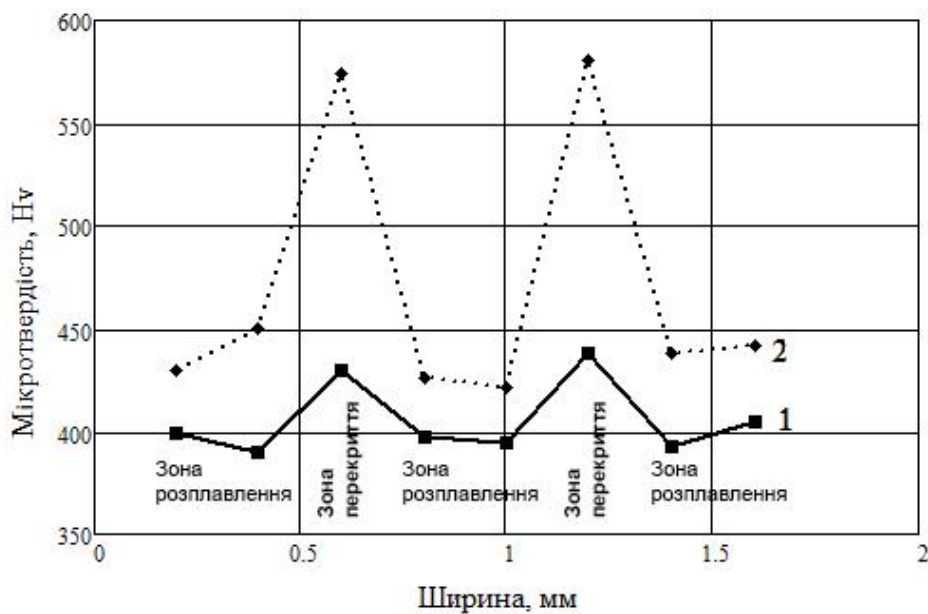


Рисунок 24. Мікротвердість за шириною обробленої ділянки:

1 – X12МФ; 2 – СЧ21

В багатьох попередніх дослідженнях перехідних зон вказувалось на наявність в них трооститу, характерного для зони відпуску, із зниженою мікротвердістю в порівнянні із зонами лазерного гартування. Це пов'язано з малою щільністю енергії в зоні лазерного впливу твердотільних та CO₂ лазерів. При повторному лазерному впливі в перехідній зоні через велику протяжність за

шириною температура не встигає повторно досягти величин, характерних для утворення гартувальних структур, і тому виникає зона відпуску.

Досліджувані перехідні зони мають спільну структуру із зоною термічного впливу. Мікротвердість перехідних зон рівна мікротвердості ЗТВ. Це обумовлюється більш високою щільністю потужності лазерного випромінювання, введеною в зону обробки оптоволоконним ітербієвим лазером. Для сталі характерна невелика різниця мікротвердості зони розплавлення, зони термічного впливу і перехідної зони між двома обробленими ділянками. Для чавуну характерна наявність яскраво вираженої межі між мікротвердістю даних зон обробки.

У процесі експериментального дослідження здійснювалась лазерна обробка крім сірого чавуну СЧ 21 ще й високоміцного чавуну ВЧ 50 за допомогою оптоволоконного ітербієвого лазера в режимі безперервної дії з частковим розплавленням поверхні при щільності потужності випромінювання $4,5 \times 10^3$ Вт/см² та швидкості обробки 10 мм/с. Поперечні перерізи зони обробки відповідних зразків зображені на рис. 25 [348].

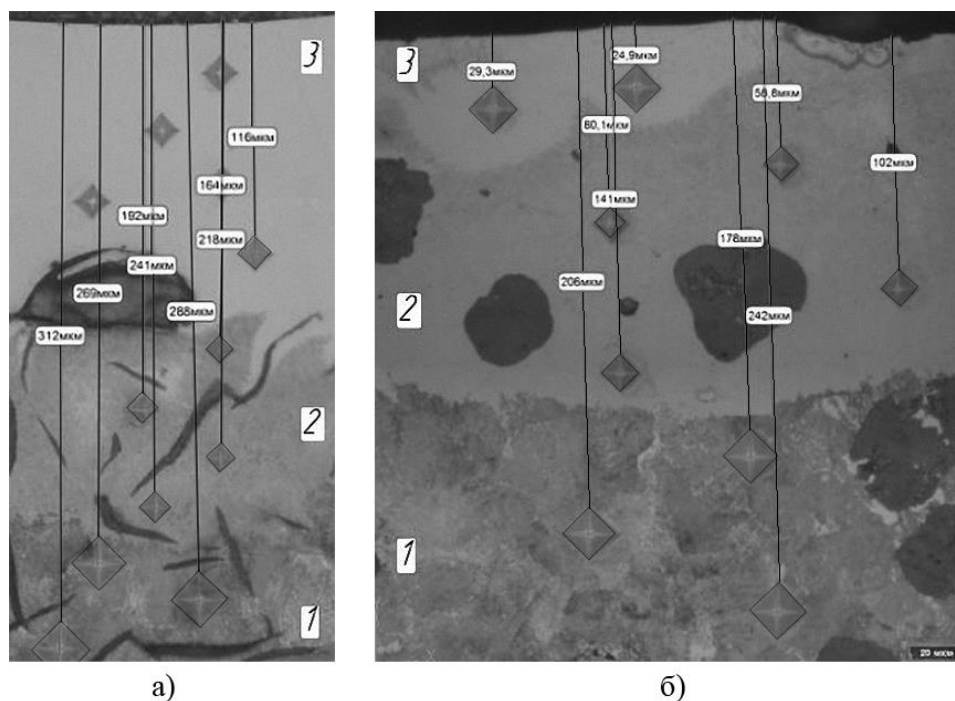


Рисунок 25. Поперечні перерізи зони обробки: а) чавун СЧ 21; б) чавун ВЧ 50;
1 - основний матеріал; 2 - зона термічного впливу; 3 - зона оплавлення

Як видно з рисунка, при однаковій інтенсивності лазерного випромінювання для сірого чавуну характерне поширення зони термічного впливу на глибину до 250 мкм. При цьому поширення ЗТВ у високоміцному чавуні відбувається на глибину не більш 150-160 мкм.

При вимірі мікротвердості оброблених ділянок була вивчена одержувана структура. Так, для сірого чавуну основу становлять перліт, ферит, а також пластинчастий графіт з мікротвердістю до 280 Нv. У зоні оплавлення спостерігається ледебурит. Отримана мікротвердість зони оплавлення доходить до 500 Нv. ЗТВ складається переважно з мартенситу, залишкового аустеніту з невеликими включеннями трооститу. Мікротвердість ЗТВ доходить до 840 Нv.

В основі високоміцного чавуну спостерігається наявність перліту, фериту, а також кулястого графіту з мікротвердістю до 340-450 Нv. У зоні оплавлення присутні ділянки ледебуриту, а також залишковий аустеніт. Мікротвердість зони оплавлення доходить 600 Нv. ЗТВ переважно складається з мартенситу, з невеликими включеннями залишкового аустеніту. Мікротвердість ЗТВ доходить до 930 Нv.

У ході експериментальних досліджень вдалося підвищити в зоні обробки мікротвердість сірого чавуну СЧ 21 в 3 рази, а високоміцного чавуну ВЧ 50 в 2 рази. При цьому найбільші показники мікротвердості спостерігаються у високоміцному чавуні. У цілому отримана мікротвердість високоміцного чавуну ВЧ 50 в середньому на 10 % вище, ніж у сірого чавуну марки СЧ 21.

Відомо, що якість лазерної обробки сильно залежить від режимів, в яких відбувається зміцнення відповідних поверхонь. Їх вплив на середні значення мікротвердості в зоні оплавлення може бути різним. Як видно на рис. 26, при збільшенні потужності випромінювання від 0,5 до 1,5 кВт мікротвердість зростає [348]. Це обумовлено прискоренням розчинення графіту, зменшенням кількості мікропор і збільшенням кількості ледебуриту. Незважаючи на те, що при збільшенні швидкості обробки вміст мартенситу зростає, мікротвердість при цьому зменшується.

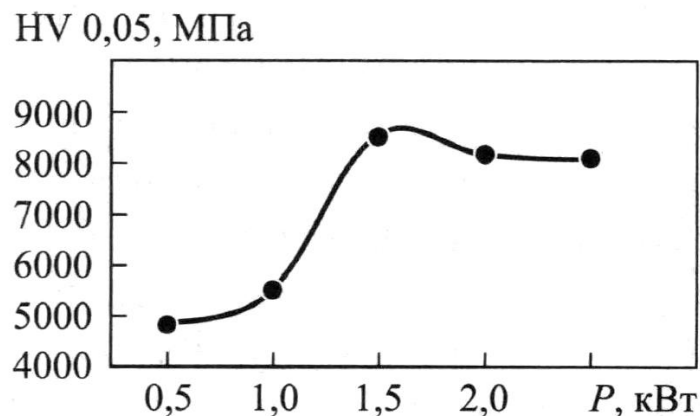


Рисунок 26. Залежність мікротвердості на поверхні зони оплавлення сірого чавуну від потужності лазерного випромінювання

Підвищення потужності в інтервалі 1,5...2,5 кВт призводить до деякого зниження мікротвердості. Очевидно, у цьому випадку графіт майже повністю розчиняється. Зі збільшенням потужності відбувається насичення аустеніту вуглецем, зменшення частки мартенситу та збільшення частки залишкового аустеніту внаслідок зменшення швидкості охолодження. Крім того, через зневуглецювання вміст цементиту зменшується.

Збільшення швидкості обробки призводить до зменшення ступеня насичення вуглецем матриці навколо графітних включень у верхній частині ЗТВ. У нижній частині ЗТВ незавершеність аустенітизації при нагріванні зростає і твердий розчин насичується вуглецем в меншій мірі. В результаті цього при збільшенні швидкості середні значення мікротвердості помітно знижуються (рис. 27) [348].

Більш технологічними є чавуни із дрібними включеннями пластинчастого графіту, оскільки графіт у них при оплавленні розчиняється в більшій мірі, чим в чавунах з компактною формою графіту (високоміцних і ковких). Особливо це помітно при обробці з оплавленням імпульсним випромінюванням, а також безперервним випромінюванням потужністю до 1 кВт.

Здійснювати зміцнення чавунів з оплавленням при високій щільності потужності та швидкості обробки не рекомендується. Крім того, імпульсне гартування з оплавленням може призводити до утворення зони оплавлення краплинного виду.

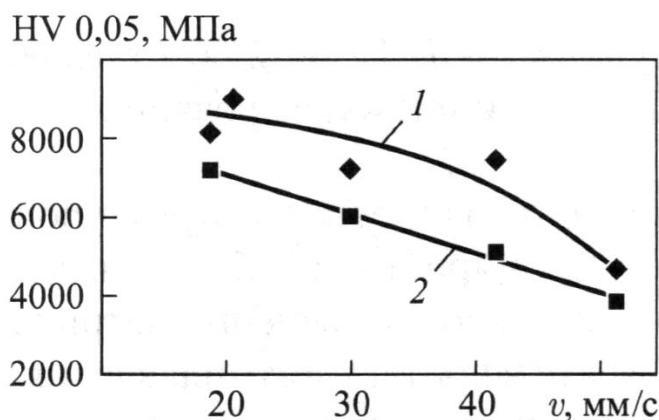


Рисунок 27. Залежність середніх значень мікротвердості в ЗТВ
чавуну ВЧ 50-1,5 від швидкості обробки при:

$$1 - q_n = 50 \text{ МВт/м}^2; 2 - q_n = 100 \text{ МВт/м}^2$$

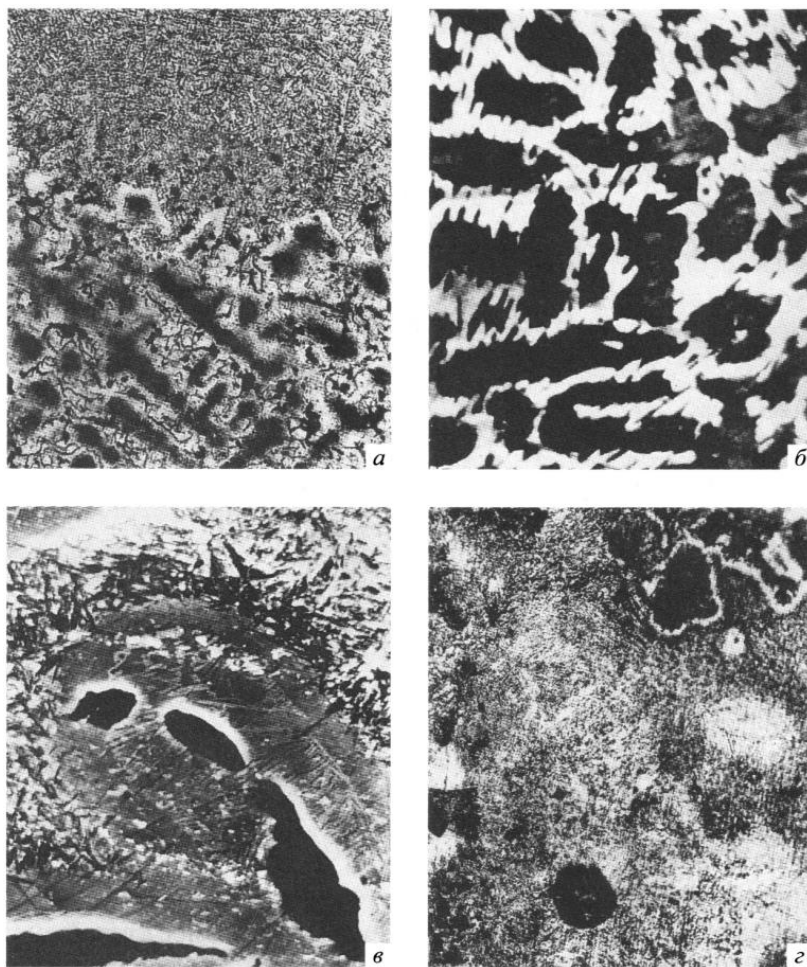
Важливу роль відіграє правильний підбір марки чавуну. Більш технологічними є чавуни із дрібними включеннями пластинчастого графіту, оскільки графіт у них при оплавленні розчиняється в більшій мірі, чим в чавунах з компактною формою графіту (високоміцних і ковких). Особливо це помітно при обробці з оплавленням імпульсним випромінюванням, а також безперервним випромінюванням невеликої потужності.

Чавун у порівнянні зі сталлю в результаті лазерної обробки має значно вищі показники міцності та, за умови подальшої спеціальної обробки, може мати гарні показники зносостійкості.

При обробці з оплавленням графіт розчиняється в розплаві і після охолодження в зоні оплавлення формується структура білого чавуну, тобто затвердіння відбувається за метастабільною діаграмою залізо – вуглець без виділення вільного графіту. При високій швидкості охолодження загальна закономірність кристалізації білих чавунів може змінюватися.

У доєвтектичному чавуні кристалізація починається із виділення первинних зерен аустеніту, потім при температурі 1147°C відбувається утворення евтектики – ледебуриту. Як видно на рис. 28, а [350], в структурі зони оплавлення важко виділити надлишкові кристали аустеніту; в ній міститься

дрібнодисперсна суміш аустеніту і цементиту, що має дендритну будову. Очевидно, через високу швидкість охолодження кристалізація надлишкового аустеніту пригнічується і весь розплав твердне квазіевтектично з утворенням квазіледебуриту. Квазіевтектичній кристалізації доевтектичних чавунів сприяє вирівнювання концентрації кремнію в зоні оплавлення, що призводить до зміщення евтектичної точки на діаграмі вліво.



a – зона оплавлення і ЗТВ сірого чавуну (х300); *б* – зона оплавлення (х3600);

в – верхня частина ЗТВ (х630); *г* – нижня частина ЗТВ чавуну ВЧ50-1,5 (х250)

Рисунок 28. Мікроструктура ЗЛВ сірих чавунів

Після обробки безперервним CO₂-лазером сірого чавуну кількість аустеніту в зоні оплавлення коливається в межах 25...65%, цементиту – 10...45%, а α -Fe – 5...50%. При цьому зі збільшенням швидкості обробки кількість α -Fe збільшується, а γ -Fe – зменшується. Наявність в ЗЛВ α -Fe пов'язано з частковим

перетворенням аустеніту в процесі гартування в мартенсит. Присутність графіту в зоні оплавлення обумовлено його неповним розчиненням, а також надходженням з нижніх шарів розплаву при спливанні графітових включень. Це призводить не тільки до деякого зниження мікротвердості, а й до утворення включень і пор біля самої поверхні. Найбільша кількість пор утворюється при високих швидкості обробки і щільності потужності випромінювання.

Для зменшення пороутворення в ряді випадків перед лазерною обробкою рекомендується попереднє вакуумування деталей, в результаті чого кількість газу, сорбованого графітом, зменшується. Однак це значно ускладнює процес. Більш простим прийомом для зменшення кількості пор в зоні оплавлення є зниження щільності потужності випромінювання і швидкості обробки. У цьому випадку небезпека утворення тріщин, які є поширеним видом дефектів при обробці з оплавленням, також зменшується. Однак при глибині оплавленого шару більше 0,5 мм навіть при малій швидкості обробки утворення тріщин в чавунах знову може посилитися.

Мікротвердість в зоні оплавлення чавуну марки ВЧ60-2 становить 8000...11000 МПа, СЧ24-44 – 7400...10000 МПа, сірого низьколегованого – 6500...8500 МПа, а КЧ35-10 – 6000...8000 МПа.

Зона гарту з твердої фази відрізняється дуже неоднорідною структурою. Нижче лінії оплавлення знаходиться світла смуга шириною 10...20 мкм, що свідчить про те, що тут мало місце значне насичення матриці вуглецем з графітних включень. Через ефект «контактного плавлення» межа між зоною оплавлення і ЗТВ в чавунах дуже нерівна. Ефект полягає в тому, що металева або феритна матриця близько графітних включень насичується вуглецем, в результаті чого температура її плавлення знижується. З цієї ж причини у верхній частині ЗТВ матриця навколо графіту оплавляється і насичується вуглецем. Ступінь насичення на різній відстані від графіту різна, тому в міру віддалення від графітних включень спостерігається гамма структур (рис. 28, в). Близько графіту утворюється світлий шар ледебуриту, далі – шар аустеніту, і, нарешті, –

аустенітно-мартенситна голчата структура. При малих розмірах пластин графіт може повністю розчинитися і ледебуритна структура може бути відсутня.

У середній і нижній частинах ЗТВ насичення вуглецем до аустенітної і аустенітно-мартенситної структури може відбуватися і без оплавлення (рис. 28, з). Мікротвердість цих ділянок також різна: з аустенітною і аустенітно-мартенситною структурою – 6400...6770 МПа, а з цементитною і ледебуритною структурою – 10000...12000 МПа. Утворення цементитних прошарків може бути причиною окрихчування.

У нижній частині ЗТВ, де насичення матриці з графіту дуже незначне, в структуру входять мартенсит і залишковий аустеніт. Біля границі з вихідним металом процес аустенітизації перліту при нагріванні не встигає завершитися, тому там є нерозчинені частинки цементиту. Оскільки твердий розчин ненасичений вуглецем, мікротвердість знижується до 6700 МПа і навіть до 3500...4100 МПа.

Для оптимізації технологічного процесу гартування поверхні чавунів лазером необхідно оцінити вплив тривалості дії випромінювання τ на структуру та твердість даних сплавів.

Так, здійснюючи лазерну обробку безперервним CO₂-лазером, при зміні τ для чавуну СЧ21 в межах 0,16-1,2 с, швидкість охолодження нагрітого об'єму металу перевищує критичну швидкість загартування, про що свідчить твердість отриманих в ЗЛВ структур (рис. 29) [351].

Структурна неоднорідність за глибиною ЗЛВ, що виникає при збільшенні τ , супроводжується нерівномірним розподілом твердості. На кривій мікротвердості, що відповідає $\tau = 1,2$ с (рис. 29), є провали, пов'язані з попаданням індентора мікротвердоміру ПМТ-3 на аустенітні ділянки. Спостережуване збільшення кількості залишкового аустеніту з ростом τ , ймовірно, пов'язане з великим насиченням твердого розчину вуглецем.

Вибір режиму гартування чавуну СЧ21 та відповідного йому структурного стану в ЗЛВ повинен проводитися з урахуванням умов експлуатації конкретної деталі, так як аустеніт може надавати різний вплив на зносостійкість. Стосовно

пари тертя, наприклад, циліндр двигуна – компресійне кільце, залишковий аустеніт може сприяти кращому припрацюванню даної пари.

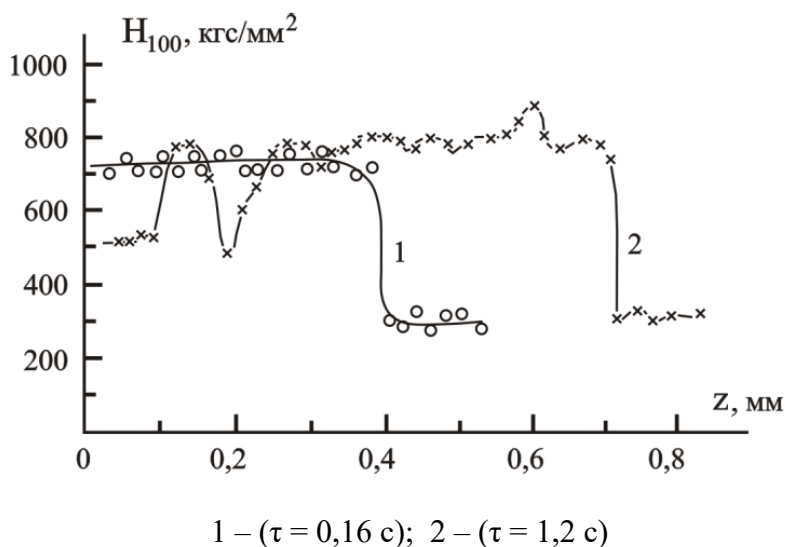


Рисунок 29. Розподіл мікротвердості за глибиною зони лазерного впливу в чавуні СЧ21 ($P_0 = 2,2$ кВт)

Застосування швидкого сканування лазерного пучка поперек напрямку руху забезпечує поліпшення форми перерізу загартованої смуги, наближаючи її до прямокутної, і згладжування поверхневого рельєфу оплавленого шару.

Для лазерного зміцнення високоміцного чавуну ВЧ40 з оплавленням використовувався твердотільний YAG-лазер з двокоординатним сканатором потужністю $P_0 = 400$ Вт при наступних параметрах обробки: швидкість переміщення зразка $V = 1,7$ см/с, радіус лазерного пучка $R = 0,5$ мм, амплітуда сканування $q = 2,6$ мм, частота сканування $f = 160$ Гц [351].

Після лазерної обробки відповідні шліфи зразків досліджувалися традиційними металографічними методами.

Форма перерізу загартованих смуг стала близька до прямокутної. Глибина зони оплавлення склала $0,05 \dots 0,1$ мм, зони гартування з твердого стану – $0,1 \dots 0,15$ мм, а загальна глибина гартування – $0,15 \dots 0,25$ мм. Ширина загартованої смуги – $2,7 \dots 3,1$ мм. Мікротвердість вибіленого шару високоміцного чавуну ВЧ40 склала $7 \cdot 10^3 \dots 8,7 \cdot 10^3$ МПа, а в зоні лазерного

гартування з твердого стану для аустенітно-мартенситної структури – $6 \cdot 10^3 \dots 7,5 \cdot 10^3$ МПа.

Характерний розподіл значень мікротвердості чавуну ВЧ40 за глибиною зони лазерної обробки наведено на рис. 30 [351]. Розкид значень геометричних розмірів та мікротвердості пов'язаний з відмінностями у вихідній структурі сплаву зразків з різних партій лиття, а також не завжди стабільною якістю фосфатування та, відповідно, коефіцієнтом поглинання лазерного випромінювання.

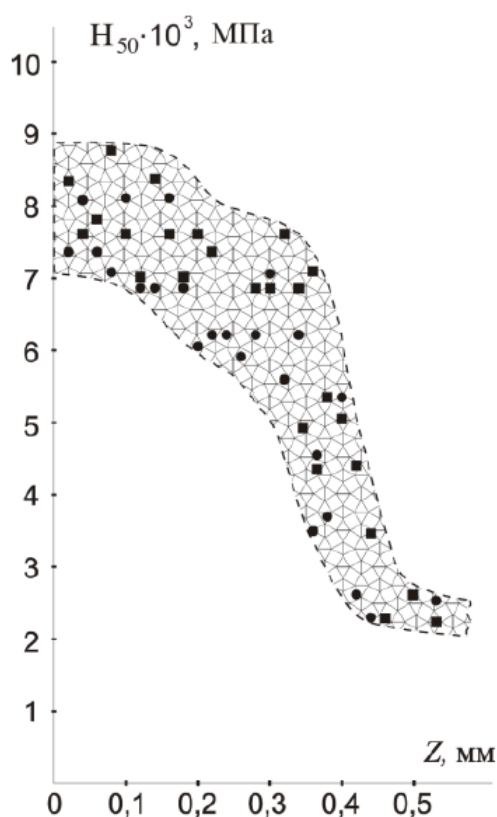


Рисунок 30. Розподіл мікротвердості за глибиною зони лазерної обробки чавуну ВЧ40

Лазерна обробка чавунів з оплавленням призводить до розчинення графіту в розплаві, внаслідок чого в зоні оплавлення при кристалізації формується структура вибіленого чавуну. Після лазерної обробки в цій зоні майже не спостерігаються залишки графітних включень. Це пов'язано з використанням швидкого поперечного сканування, коли на кожну ділянку оброблюваної

поверхні протягом долі секунди фактично діє послідовність багатьох десятків лазерних імпульсів (джерело тепла носить імпульсно-періодичний характер).

Повне розчинення графіту створює умови для збільшення частки цементиту. Кристалізація відбувається при високих швидкостях охолодження і здійснюється за механізмом, близьким до квазіевтектичного без виділення вільного графіту. У структурі вибіленого чавуну спостерігається вирівнювання концентрації кремнію, сама структура значно подрібнена. Між осередками аустеніту в міждендритних проміжках структура має вигляд нерівноважної суміші заевтектичного виду з великою кількістю цементиту, що визначає високу твердість цієї зони.

Зона гартування з твердої фази має дуже неоднорідну структуру. У її верхній частині (поблизу нижньої межі зони оплавлення) навколо графітних включень є світлі смуги в 10...20 мкм, які свідчать про те, що тут мало місце локальне оплавлення та значне насичення матриці вуглецем з графітних включень. При насиченні до формування аустеніто-цементитної структури мікротвердість цих смуг досить висока.

Поруч з графітом утворюється шар з переважанням цементиту, далі – пластинчастий ледебурит, ледебурит і аустеніт, однорідний аустеніт та, нарешті, аустенітно-мартенситна голчата структура. У середній області зони гартування з твердої фази є чергування світлих та темних ділянок, що обумовлюється насиченням матриці вуглецем до різного рівня на різних відстанях від графітних включень. У нижній частині насичення матриці вуглецем незначне.

Таким чином, виконуються загальні вимоги до результатів лазерного гартування виробів із чавуну. Ресурс роботи відповідних зміцнених чавунних деталей сільськогосподарської техніки в результаті застосування методу поверхневої лазерної обробки значно збільшиться.

Отже, чавун, який використовується вітчизняними виробниками деталей сільськогосподарських машин, може успішно піддаватись лазерній обробці, що забезпечить значне підвищення його механічних властивостей та надасть змогу у певних випадках зручно замінити ним значно дорожчі сталі.

Дослідження зон перекриття зразків із чавуну після лазерного гартування дозволили зробити висновок про можливість застосування оптоволоконних лазерів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей сільськогосподарських машин.

Проведені дослідження підтвердили, що технологічні установки з твердотільними лазерами потужністю від 400 Вт і вище можуть ефективно використовуватися для поверхневого гартування залізовуглецевих сплавів та успішно конкурувати з більш потужними CO₂-лазерами.

Відсутність зон відпуску в перехідних ділянках говорить про можливість гартування ділянки оброблюваної поверхні за всією шириною обробки.

Зміцнювати чавуни слід при невисокій щільності потужності та невеликій швидкості обробки.

7.1.5. Застосування лазерно-плазмового методу зміцнення деталей двигунів внутрішнього згоряння із чавуну

Одним із можливих методів зміцнення деталей двигунів внутрішнього згоряння є лазерно-плазмова обробка [352]. Для ефективного застосування даного методу модифікації поверхонь металевих виробів необхідно враховувати внутрішні процеси в поверхневому шарі зміцнюваних зразків, що відбуваються внаслідок впливу лазерно-плазмового струменю, а також залежність властивостей зміцнюваного зразка від заданих параметрів лазерно-плазмової обробки.

Правильний підбір параметрів процесу зміцнення під час застосування лазерно-плазмового методу (ЛПМ) забезпечуватиме значно вищі показники міцності та зносостійкості оброблюваних зразків, ніж можуть забезпечити інші методи.

Тому системне дослідження особливостей впливу лазерно-плазмового струменю на зміцнювану поверхню матеріалу на даний момент є актуальним та важливим.

Лазерно-плазмовий метод заснований на застосуванні плазми оптичного пульсуючого розряду (ОПР), який запалюється повторюваними з високою

частотою слідування (десятки кілогерц) лазерними імпульсами в фокусі променю CO₂-лазера в швидкісних потоках газів з домішками реагуючих компонентів на поверхні оброблюваного матеріалу. Експериментальними і теоретичними методами визначено, що плазма ОПР для ініціації хімічних реакцій має унікальне поєднання властивостей, недоступних для існуючих способів (індукційний надвисокочастотний нагрів НВЧ, тліючий, дуговий і безперервний оптичний розряди, піроліз, горіння):

- рекордною (для плазмохімічних методів) питомою потужністю енерговиділення в обсязі газової фази до 5 ГВт/см³;
- можливістю отримання локально рівноважної (час обміну ~ 10 нс) плазми при тиску 1 атм і більше;
- високою температурою і концентрацією ($10^{18} \dots 10^{19}$ см⁻³) частинок;
- високим рівнем ультрафіолетового радіаційного обміну, сприятливого для дисоціації, іонізації, збудження частинок;
- швидким (за мікросекунди) охолодженням плазми ОПР, що забезпечує контрольоване гомогенне утворення частинок без забруднень, зменшення їх розміру, пригнічення їх росту, отримання не тільки наночастинок, а й нанокластерів.

Поряд з фізико-хімічними перевагами ЛПМ необхідно відзначити загальні переваги для розробки промислових нанотехнологій, а саме:

- процес може проводитися при тиску газу в зоні реакції більше атмосферного, що дозволяє в багатьох випадках виключити з технологій дорогі вакуумні системи, відмовитися від робочої камери і проводити обробку великогабаритних виробів складної конфігурації автоматизованими маніпуляторами за заданою програмою;
- ефективний обмін енергією між лазерною плазмою і металом забезпечує 7-10-кратне збільшення продуктивності ЛПМ в порівнянні з традиційним лазерним гартуванням і 3-4-кратне – для технологій наплавлення, легування;

- високі робочі тиски забезпечують осадження нанокompозитних покриттів зі швидкостями синтезу на 2-3 порядки більшими, ніж у відомих методах плазмохімічного осадження з газової фази;
- метод дозволяє використовувати широкий спектр вихідних компонентів (гази, аерозолі, пари) і вибирати з них найбільш прийнятні для промислової реалізації технології;
- широкі діапазони управління характеристиками імпульсно-періодичного випромінювання, швидкістю потоку (0...500 м/с), сортом та складом буферного або робочого газу (Ar, He, Ne, H₂, N₂, O₂, CO, CO₂ та ін.) забезпечують можливості широкого пошуку і оптимізації за ефективністю варіанта технології;
- можливість проведення спрямованого синтезу наноматеріалів з використанням вихідних компонентів у вигляді стехіометричної суміші аерозолів (в тому числі тугоплавких), що значно спрощує і здешевлює завдання підбору вихідних реагентів.

Основою лазерно-плазмової технологічної установки, що визначає її технологічні можливості, є імпульсно-періодична CO₂-лазерна система генератор-підсилювач середньою потужністю до 2 кВт і імпульсною потужністю близько сотні кіловат з можливістю управління частотою слідування (до 120 кГц) і тривалістю лазерних імпульсів. Оригінальна оптична схема системи генератор-підсилювач дозволяє формувати промінь з плоским фронтом, плавним розподілом інтенсивності і якістю, близькою до дифракційної межі, усунути ефекти самозбудження системи «лазер-метал» поблизу фокуса, які призводять до спотворення форми імпульсу (зниження імпульсної потужності), а також розподілу інтенсивності і в результаті до нестабільності лазерно-плазмової обробки.

Лазерний промінь поворотними дзеркалами, розташованими на рухомих порталах і каретці програмно-керованого двокоординатного столу, направляється на лінзу лазерно-плазмової обробної головки і фокусується на осі газового потоку з домішками реагуючих компонентів. Таке технічне рішення дозволяє

проводити лазерно-плазмову обробку безпосередньо в атмосфері і тільки необхідних заданих областей виробу.

Існуючі лазерно-плазмові технологічні установки забезпечують широкі діапазони можливостей лазерно-плазмової обробки за інтенсивністю променя (до $2...3 \text{ ГВт/см}^2$), за швидкістю потоку (до 500 м/с) і за тиском газу в плазмохімічній камері (до $0,5 \text{ МПа}$) для модифікації поверхні металів з приповерхневою плазмою.

При лазерно-плазмовій модифікації поверхні металів повторювані з високою частотою слідування лазерні імпульси, сфокусовані на поверхні металу рухомого зразка, запалюють плазму оптичного пульсуючого розряду в потоці робочого легуючого газу (наприклад, азоту при нітридизації) (рис. 31) [352].

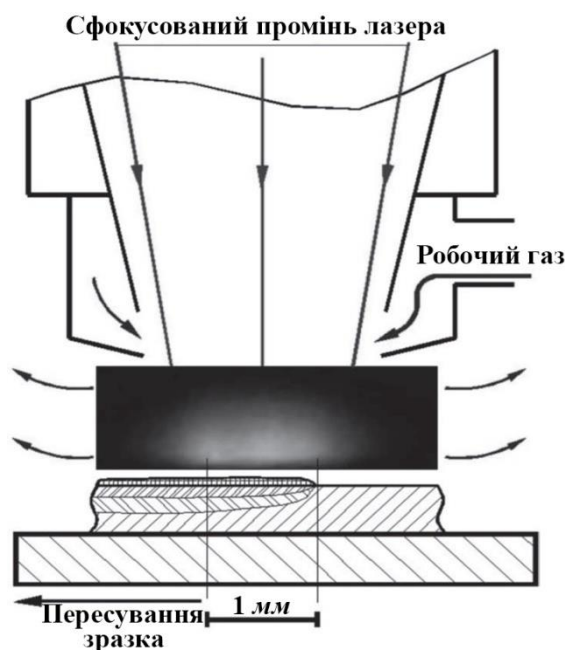


Рисунок 31. Схема лазерно-плазмової обробки металу із зображенням приповерхневої плазми оптичного пульсуючого розряду

Набір осцилограм, одержаний під час проведення ЛПМ-обробки, дозволяє визначити, коли і при якій потужності випромінювання настає перевищення інтенсивності над порогом запалювання і виникає лазерна плазма, а також

динаміку і ефективність поглинання лазерного випромінювання утворюваною плазмою (рис. 32) [352].

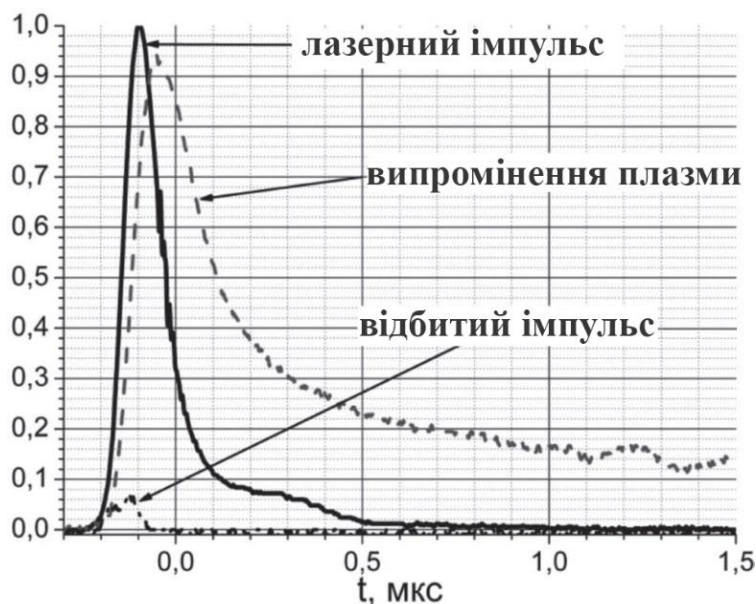


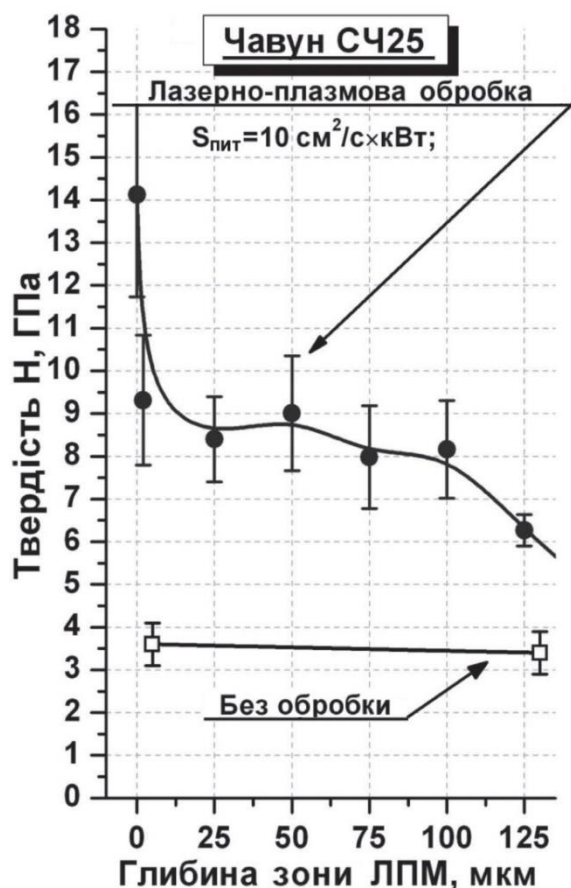
Рисунок 32. Осцилограми лазерного імпульсу, випромінювання плазми та відбитого від металу лазерного імпульсу

Залежно від частоти проходження лазерних імпульсів, розміру плями опромінення і відносної швидкості переміщення променя та деталі цикл обробки може включати десятки-сотні впливів лазерної плазми на кожну ділянку поверхні. Як правило, тривалість циклу обробки в умовах інтенсивного впливу променя і лазерної плазми (десятки МВт/см^2) обмежена розплавленням поверхневого шару, що перевищує допуски на шорсткість оброблюваної поверхні. Разом з тим, для досягнення більшої рівномірності і поліпшення технологічних характеристик виробу, наприклад, твердості і глибини зони лазерно-плазмової модифікації (рис. 33), замість одного циклу обробки можливе проведення декількох повторюваних циклів з більшою швидкістю і з меншою кількістю енергії [352].

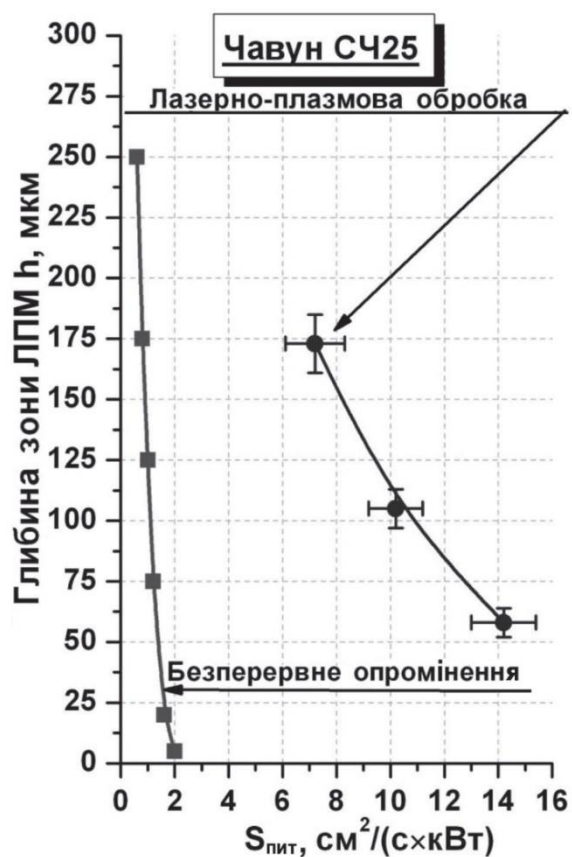
Необхідно відзначити, що періодична (20...100 кГц) дія лазерної плазми на поверхню металу в легуючій атмосфері одночасно формує:

– високотверде наноструктуроване твердофазне покриття (нітриди, карбіди тощо);

- хвилю дифузії, утворення легованого шару або твердого розчину (наприклад, твердий розчин азоту в титані);
- теплову хвилю і структурно-фазові (наприклад, мартенситні) перетворення;
- гіперінтенсивний ультразвук (амплітуда до 10...15 МПа), що сприяє ущільненню мікроструктури в гарячій зоні.



a



б

Рисунок 33. Мікротвердість (*a*) та глибина зони (*б*) лазерно-плазмової модифікації поверхні чавуну СЧ25 в залежності від питомої (на 1 кВт потужності лазера) швидкості обробки

Найбільш детальне дослідження можливостей методу проведено для лазерно-плазмової модифікації поверхні антифрикційного чавуну на перлітній основі (з метою визначення перспектив застосування ЛПМ для зміцнення гільз

циліндрів двигунів внутрішнього згоряння) на зразках, вирізаних з циліндрових втулок двигунів внутрішнього згоряння.

Для всіх досліджених зразків спостерігалася модифікація поверхні з утворенням двох шарів. Верхній наноструктурований шар товщиною сотні нанометрів набуває мікротвердість в діапазоні 12...15 ГПа (див. рис. 33а) за рахунок насичення азотом і завдяки утворенню тонкої мікроструктури. До верхнього наноструктурованого шару прилягає шар, що має ділянки зі структурою ледебуристу (гартування з рідкого стану) і мартенситу (гартування з твердого стану). Причому фазові перетворення з плавленням металу починаються внаслідок концентраційної неоднорідності розподілу вуглецю за фазами сплаву закономірно навколо графітових включень. У цьому шарі (між поверхневим нан шаром і основою металу) відбуваються структурні перетворення, характерні для лазерної гартування, які призводять до збільшення мікротвердості до рівня 8...10 ГПа (в 3-4 рази твердіше основи) на товщині в десятки-сотні мікрометрів (див. рис. 33а).

Порівняння питомої продуктивності лазерно-плазмової обробки чавуну СЧ25 з традиційним лазерним гартуванням безперервним випромінюванням показало, що продуктивність лазерно-плазмової обробки в 7-10 разів вище, ніж у традиційного лазерного гартування (див. рис. 33б). Це пояснюється 4-5-кратним зростанням ефективності енергообміну між лазерною плазмою і металом, порівняно із прямим поглинанням лазерного випромінювання, а також дією гіперінтенсивного ультразвуку.

Оцінка триботехнічних властивостей проводилася при випробуванні зразків після попереднього взаємного притирання поверхонь диска (загартована сталь 40) і колодки (зразок, вирізаний з циліндричної втулки двигуна). Питоме навантаження в умовах рідинного тертя при змащуванні маслом становить 1250 МПа. Результати випробувань представлені на рис. 34 [352]. Оброблені лазером зразки зношувалися в прийнятих умовах випробувань зі швидкістю, в 20 разів меншою в порівнянні зі швидкістю зношування вихідних (без ЛПМ модифікації) зразків. При цьому на третину зменшився коефіцієнт тертя.

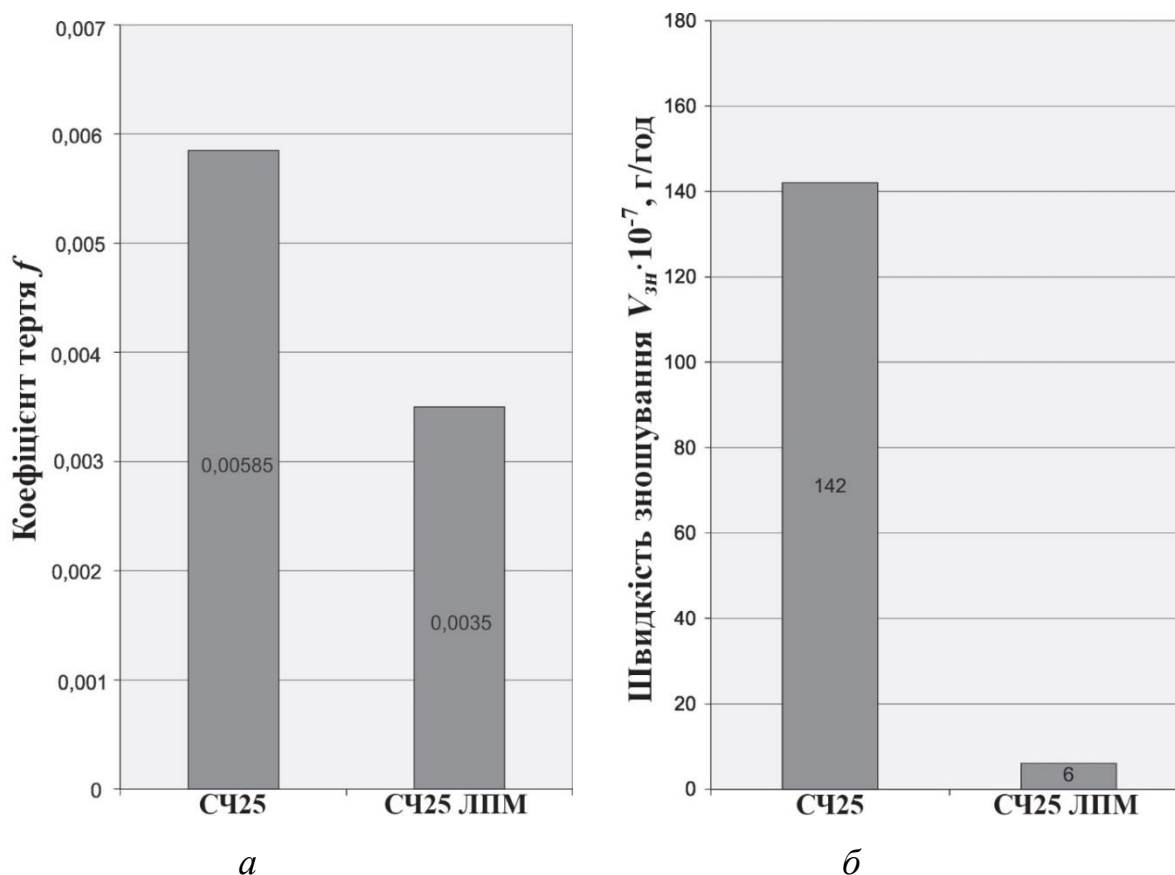


Рисунок 34. Вплив лазерно-плазмової обробки на коефіцієнт тертя (а) та швидкість зношування (б) зразків із сірого чавуну у парі тертя «сталевий диск – чавунна колодка»

У підповерхневих шарах графітові пластини оточені шарами металу зі структурою, отриманою загартуванням з рідкого (ледебурит) і твердого (двійниковий мартенсит) стану. Ці тверді ділянки сприймають зусилля, що виникає в парі тертя, забезпечуючи зносостійкість чавуну. Крім того, вони перешкоджають затиранню графітових частинок, зберігаючи мастилоутримуючий рельєф поверхні і забезпечуючи тим самим низький коефіцієнт тертя.

Для перевірки впливу твердих фаз, отриманих при ЛПМ обробці чавуну, на властивості міцності проведені випробування на статичний згин σ_z і ударну в'язкість a_n . Отримані результати (табл. 1) не показують помітного зниження міцності на згин і ударної в'язкості сірого чавуну після ЛПМ. Отже, в цілому, даний метод показує кращі показники, ніж звичайне лазерне зміцнення [352].

Таблиця 1

Вплив лазерно-плазмової обробки на механічні
властивості сірого антифрикційного чавуну на перлітній основі

Стан матеріалу	Питома швидкість зношування $V_{\text{зн}} \cdot 10^{-7}$, г/год	Коефіцієнт тертя f	Статичний згин σ_z , МПа	Ударна в'язкість a_n , КДж/м ²
СЧ25 без обробки	142	0,0059	400...420	85...90
СЧ25 після ЛПМ	6	0,0035	420...430	80...85

Таким чином, шляхом застосування лазерно-плазмового методу виконана високопродуктивна модифікація поверхні сірого чавуну, на якій сформована унікальна композитна структура, що складається з високотвердого поверхневого шару з мікротвердістю 12...20 ГПа і загартованого підшару з мікротвердістю 8...10 ГПа та товщиною в десятки-сотні мікрон. Випробуваннями на зразках з сірого чавуну на перлітній основі марки СЧ25 показано, що така композитна структура може багаторазово збільшити зносостійкість відповідних деталей, що визначають ресурс техніки.

Висновки: Отже, лазерне зміцнення різноманітних деталей сільсько-господарської техніки може бути вже зараз успішно застосоване на виробництві та забезпечити значне підвищення показників міцності і зносостійкості оброблюваних зразків та значно продовжити термін їх експлуатації у галузі агропромислового виробництва.

SECTION 8. METALLURGY

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.8.1

8.1 Дослідження факторів, що впливають на якість чавунних прокатних валків

8.1.1 Характеристика, умови експлуатації та вимоги до матеріалу чавунних прокатних валків

Підвищення продуктивності прокатних станів та якість листового прокату висувають високі вимоги до експлуатаційних властивостей формуючого інструменту та збільшення терміну його служби. Конструкційним матеріалом, що широко використовується для виготовлення прокатних валків, є чавун. Чавунні литі валки менш міцні, ніж сталеві, але більш зносостійкі, тому їх застосовують у передчистових та чистових клітках листопрокатних, сортопрокатних та трубопрокатних станів. Чавунні валки з кулястим графітом застосовують у чорнових клітках, оскільки їхня твердість не висока. Чавунні валки за складом і, отже, структури класифікують так [361]:

- валки сортопрокатні та листопрокатні (з вибіленим робочим шаром).

Вони мають робочий вибілений та перехідний шар, що складається з половинчастого чавуну. Серцевину виготовляють із сірого чавуну. Твердість таких валків становить 68...70 HSD);

- леговані хромом та нікелем валки (СПХН) з карбідо-графіто-перлітною структурою та пластинчастим графітом мають досить глибокий робочий шар, що забезпечує невелике падіння твердості на глибину рівчака з урахуванням необхідності переточування у міру зносу;

- вибілені хромонікелеві двошарові валки (ЛПХНд) з високолегованим вибіленим шаром, міцною серцевиною, шийками та тріфами з нелегованого чавуну. Вони мають вибілений шар товщиною 12...32 мм при виготовленні їх стаціонарним методом і до 60мм при відцентровому литті, коротку (5...15 мм) перехідну зону та міцну серцевину;

- вибілені хромонікелеві валки з чавуну з кулястим графітом (ЛШН та

СШХН). Глибина вибіленого шару може досягати 32 мм;

- високохромисті валки (12...18% Cr). Мають високу зносостійкість.

Вимоги до матеріалу валків нерозривно пов'язані з його поведінкою при термоциклічній дії та зносі. При розгляді цих процесів потрібно встановити роль впливу основних експлуатаційних факторів, а також виявити початкові етапи руйнування структурних складових та всієї їх поверхні. Стійкість валків визначається величиною зносу, під яким розуміють інтенсивність контактної ушкоджуваності поверхневих шарів. Знос залежить від фізичних, хімічних і механічних властивостей поверхонь тертя, поєднання матеріалів поверхонь тертя, взаємодії з розділяючим їх середовищем, чистоти механічної обробки, виду тертя, питомого тиску між тілами, швидкості взаємного переміщення поверхонь тертя відносно одна одної, тривалості взаємодії між тілами, а також системи та ступеня їх охолодження при експлуатації.

Розрізняють [361] такі види зносу: знос схоплювання; окисний; тепловий; абразивний; оспоподібний, характерний для тертя кочення. Знос схоплюванням виникає при терті ковзання з малими швидкостями відносного переміщення поверхонь, що труться, і невеликому питомому тиску при відсутності мастила. Окислювальне зношування характеризується дифузією кисню в метал деформованих при терті поверхневих шарів і утворенням твердого розчину кисню та хімічних сполук у металі. У важко навантажених деталях машин і при великих швидкостях тертя виникає тепловий знос, що характеризується процесом рекристалізації, схоплювання і оплавлення металів, що труться. Темп зношування є найбільшим. Абразивний знос - це процес дряпання поверхонь, що труться твердими абразивними частинками (цементит в чавунних валках, карбіди і окисли в підкаті) металу поверхневих шарів деталей, що труться, супроводжується протіканням мікропластичної деформації і зміцненням. При цьому виді зносу велике значення має твердість, границя міцності та в'язкість металу. Прокатні валки схильні до всіх зазначених вище видів зносу. При прокатуванні абразивному зношуванню валка сприяє окалина, яка утворюється на поверхні бочки валка та підкату. Зношування поверхні валків відбувається

також за рахунок утворення тріщин розпалу, що пов'язано з термоциклічним впливом при експлуатації. Охолоджувачем поверхні валка використовують підігріту воду, яка сприяє корозії поверхні, оскільки вона постійно знаходиться в напруженому стані. Корозійна стійкість валка залежить від відношення концентрацій Cr/C .

Руйнування валків носить, як правило, крихкий характер. У процесі експлуатації через низьку якість металу, тривалий період прокатки, неоптимального знімання металу при перешліфуванні в поверхневому шарі можуть утворюватися втомні тріщини. Розвиток їх йде повільно, тому на станах повинні використовуватися заходи щодо своєчасного ремонту валків, зокрема проводити операції відпочинку та перешліфування. У зв'язку зі зносом прокатні валки піддаються переточуванням, число яких визначається діаметром валка, глибиною робочого шару та допусками. На чавунних валках через інтенсивний спад твердості повинно забезпечуватися мінімальне знімання металу при переточках. Після певної кількості переточувань валки стають непридатними для подальшої експлуатації внаслідок суттєвої зміни розмірів. Значна кількість валків при експлуатації зазнають аварійних руйнувань внаслідок розвитку в окремих перерізах глибоких втомних тріщин. Першопричиною такого руйнування є тріщини розпалу на робочих поверхнях, зумовлені термічною втомою. Тріщини проникають до 5...6 мм, що перевищує глибину знімання металу під час переточування. При згинальних навантаженнях з'являються глибші поперечні тріщини втоми різної конфігурації. Концентратори руйнування зазвичай знаходяться на поверхні валка. Це кільцева тріщина, або залишки розпальних - при багатоосередковому руйнуванні, вдавлена окалина, сліди механічної обробки (підрізи). Причиною багатоосередкового руйнування може бути неоднорідна мікроструктура, що пов'язана з різною міцністю структурних складових, підвищеною забрудненістю поверхневих шарів неметалевими включеннями. Руйнування при експлуатації валків відбувається по бочці чи ділянці переходу від бочки до шийки. У прокатних валках найбільші стискаючі навантаження концентруються в поверхневому шарі валка, а

найбільші розтягувальні напруження виникають на половині радіуса бочки валка. Руйнування втомного характеру проходить як по тілу зерен, так і за їх межами. При прокатці поряд із термічною, корозійною втомою в матеріалі валка може проявлятися деформаційне старіння [361].

Крім зношування можливі поломки валків. Найбільш ймовірні втомні злами в переході від бочки до шийки, які відбуваються внаслідок помилок у конструкції, корозії, грубої шорсткості або надто великих зусиль прокатки. Як правило, це багатоосередкове руйнування.

Враховуючи роль впливу основних експлуатаційних факторів, що впливають на валки для гарячої прокатки листа, до них пред'являються такі вимоги [362]: висока зносостійкість для запобігання зміні профілю прокату в зоні деформації; стійкість до утворення тріщин розпалу та налипання металу смуги до робочої поверхні валка; висока стійкість до фарбування, особливо при підвищених та нерівномірних зусиллях прокатки; наявність невеликих залишкових напружень та висока механічна міцність матеріалів; висока якість зварювання робочого шару та серцевини валка; необхідні властивості шийок і серцевини при згинальних та скручувальних навантаженнях, а також висока зносостійкість шийок для роботи в жорстких умовах тертя між кільцем підшипника та шийкою. Забезпечення перелічених вище вимог може бути досягнуто за рахунок застосування методу відцентрового лиття, який значно розширює можливості використання зносостійких, але нетехнологічних матеріалів, таких як високохромисті чавуни.

Технологія відцентрового лиття особливо широко використовується при виробництві дво- та багат шарових валків з високозносостійким та твердим робочим шаром та м'якою і міцною серцевиною. Останнім часом з'явилася значна кількість публікацій та винаходів, що стосуються різних способів виробництва та застосування таких валків для широкосмугових та листових станів. При використанні таких валків значно збільшується випуск і підвищується якість обробки прокату. До факторів, що впливають на їх якість, належать: хімічний склад сплаву, температурні параметри лиття, умови

формування структури робочого шару та ін. Відцентроволиті валки, на відміну від стаціонаролитих, мають ряд переваг: збільшену товщину робочого шару; постійну твердість металу практично в усьому перерізі робочого шару; дрібнозернисту структуру. Процес виготовлення відцентроволитого валка складається з наступних етапів: виготовлення форм шийок (привідної та непривідної) та їх сушіння; підготовка кокілю; плавлення металів робочого шару та серцевини та їх модифікування; збирання форми валка; заливання металу робочого шару, а потім серцевини; розбирання форми та вилучення виливки; термообробка виливка; механічне оброблення; контроль якості.

Відцентрове лиття прокатних валків здійснюється різними способами: комбінований спосіб виливки, коли робочий шар відливається в кокіль, що горизонтально обертається, а заливка серцевини виробляється у стаціонарно встановлену форму; відцентровий відлив робочого шару і серцевини валка у форму, що обертається з похилою віссю; вертикальний метод відцентрового лиття [363]. При відцентровому литті існують великі можливості поєднання робочого шару і серцевини валка, що мають різні фізико-механічні властивості. Вибір матеріалу серцевини, що має високу міцність і пластичність, забезпечує резерв працездатності прокатного валка. Як матеріал серцевини може бути використаний сірий чавун, чавун з вермикулярним, а також пластинчастим графітом. У зв'язку зі збільшеними вимогами до властивостей міцності валків та інтенсифікації режимів прокатки з'явилася необхідність у виробництві валків, що не вимагають їх попереднього розігріву в стані. Ця проблема була вирішена шляхом виготовлення серцевини та шийок валків із високоміцного чавуну з кулястим графітом. Впровадження у виробництво позапічної обробки матеріалу серцевини відцентроволитих валків лігатурами та модифікаторами імпортного виробництва дозволило стабільно вийти на рівень механічних властивостей, що відповідають вимогам прокатників. За повідомленнями фірми "Hitachi Kinzoku Ltd" експлуатаційна стійкість відцентроволитих двошарових валків на 10-70% вище, ніж відлитих стаціонарним способом [364].

Відцентроволиті валки відрізняються і структурою. Карбіди є одним із

основних елементів структури білих легованих чавунів. Будова карбідної фази у виливках з білих зносостійких чавунів визначається хімічним складом та умовами кристалізації. Умови кристалізації дуже впливають на первинну структуру хромистих чавунів. Варіюючи швидкістю охолодження при кристалізації, напрямом тепловідведення і, роблячи інші впливи на розплав, змінюють такі важливі характеристики структури як розмір і взаємне розташування карбідів.

Щоб отримати необхідне співвідношення структурних складових та задані властивості карбідної фази, додатково вводять легуючі добавки. Оскільки робочі валки перших чистових клітей прокатних станів експлуатуються при жорстких температурних умовах, то для виготовлення робочого шару, наприклад, використовується високохромистий чавун з додатковим легуванням карбідоутворюючими елементами для отримання первинних і вторинних карбідів M_7C_3 і $M_{23}C_6$, включення карбідної фази яких дрібніші і розподілені в матриці рівномірно, що сприятливо впливає на зносостійкість і властивості міцності робочого шару валка. На даний час провідні вальцеливарні фірми виготовляють високохромисті валки з вмістом хрому 12-20% та вуглецю 2,4-3,4%. Найчастіше концентрація кремнію в межах 0,4-0,6%, а марганцю 0,8-1,2%. У ряді випадків у такий чавун вводять нікель у кількості 0,8-3,0%. Високохромисті чавуни мають низьку теплопровідність, пластичність, високу усадку і тому при виробництві характеризуються підвищеною схильністю до утворення гарячих та холодних тріщин. Для зниження їх схильності до тріщиноутворення здійснюється комплексне легування молібденом марганцем та ванадієм. Велика кількість інформаційного матеріалу, присвяченого питанням підвищення стійкості валків шляхом оптимізації легування, пов'язана з тим, що цей напрямок дозволяє суттєво змінювати структуру сплаву (співвідношення структурних складових, ступінь їхньої дисперсності) та рівень фізико-механічних властивостей, що задовольняють вимогам прокатників [365, 366]. Службові властивості білих чавунів залежать не лише від кількості та типу карбідів, а й від структури металевої основи, властивості якої, залежно від

призначення, регулюються вибором режимів термообробки валків [361].

8.1.2 Область застосування та способи виробництва відцентроволитих валків

На широкосмугових станах донедавна в перших клітинах чистових груп листових і широкосмугових станів гарячої прокатки застосовували тільки двошарові робочі хромонікель-молібденові валки з середньою твердістю робочого шару 68HSD. Внаслідок високих вимог, які пред'являються до якості поверхні прокату, виникла потреба щодо пошуку застосування нових матеріалів з більш зносостійких сплавів. Підвищення технічного рівня прокатних станів, зростання їх продуктивності при одночасному підвищенні вимог до якості прокату (точність геометричних розмірів, оздоблення продукції) висуває все більш суворі вимоги та якості прокатних валків.

Метод відцентрового лиття валків розширив можливості використання нетехнологічних зносостійких матеріалів – високохромистих чавунів. Використання валків із високохромистого чавуну фірми Bofors Akers на прокатних станах Німеччини та Скандинавії показали, що термін їх служби підвищується приблизно на 100%. Простої через перевалки робочих валків знизилися з 10 до 3% річного часу роботи стану, підвищилася якість прокату, зменшилася поперечна різнотовщинність смуги на 13-27%. При відцентровому литті валків глибина робочого шару зростає до 60-70 мм замість 12-24 мм при стаціонарному, що збільшує напрацювання на валок у 1,5-2 рази [367].

Робочий шар відцентроволитих валків характеризується більш дисперсною структурою, ніж у валків, відлитих стаціонарним способом. Підвищена дисперсність, особливо карбідної фази, сприятливо впливає на зносостійкість та властивості міцності робочого шару валка. Збільшується щільність металу та зростає товщина та однорідність робочого шару за висотою виливка, знижується їх схильність до викрошування. Відповідно даним фірми "Hitachi Kinzoku Ltd" експлуатаційна стійкість відцентроволитих двошарових валків на 10-70% вище, ніж тих, що відлиті стаціонарним способом [364].

При використанні валків із високохромистих чавунів необхідно забезпечити високу зносостійкість для запобігання зміні профілю прокату в зоні деформації; стійкість до утворення тріщин розпалу та налипання металу смуги до робочої поверхні; високу стійкість до викрошування, особливо при підвищених та нерівномірних зусиллях прокатки; наявність невеликих залишкових напружень та достатню механічну міцність матеріалу робочого шару, а також необхідну якість зварювання робочої поверхні з серцевиною валка. При відцентровому литті існують великі відмінності у поєднанні матеріалів робочого шару та серцевини валка, які мають відмінні фізико-механічні властивості. Вибір матеріалу серцевини, що має високу міцність і пластичність, забезпечує надійність працездатності інструменту. Необхідні властивості шийок та серцевини при згинальних та скручувальних навантаженнях, як правило, досягають додатковим легуванням та модифікуванням металу. У ряді випадків для металу серцевини крім сірого чавуну використовують високоміцний [361].

В останні роки технологія відцентрового лиття особливо широко використовується при виробництві дво- та багат шарових валків [368]. Проведений аналіз показав, що відцентрове виливок прокатних валків здійснюється різними способами. Комбінований спосіб передбачає виливок робочого шару горизонтально в кокіль, що обертається, а заливку серцевини виробляють в стаціонарно встановлену форму. Метод розроблено та реалізовано у промислових умовах японською фірмою "Kubota". У такий же спосіб виробляє валки шведська фірма "Bofors Akers", японська фірма "Kantok Rolls". На даний час на ливарному заводі фірми "Kubota" виробляються відцентроволиті валки діаметром від 500 до 950 мм, довжиною бочки від 1200 до 2200 мм та вагою від 3 до 17т. Відцентрове відливання робочого шару і серцевини валка в форму, що обертається, з похилою віссю виробляється фірмою "Hitachi Kinzoku Ltd". На вальцеливарному заводі фірми відливають валки ширококутових та сортових станів з діаметром 410 – 835мм, довгою бочки 900 – 2450мм та вагою до 12т. На заводі щорічно виробляється до 5,5 тис.т відцентроволитих валків для ширококутових станів.

Вертикальний метод відцентрового лиття був вперше застосований у Європі фірмами "Gontermann Peipers" та "Marichal Ketin" [369-372]. В даний час цей спосіб виливки застосовується у Великій Британії фірмою "Midland Rolls Maners", "USINOR" (Франція), "Sulzer" (Австрія). Фірма "Midland Rolls Maners" освоїла технологію виробництва відцентроволитих валків вагою від 3 до 15т.

Відцентрове виливок двошарових валків набуло широкого застосування для виробництва робочих валків чистової групи клітей ширококутових станів. Застосування методу відцентрового лиття дозволило значно покращити показники якості та експлуатаційні характеристики таких валків. При відливанні зміна твердості (її спад) по глибині робочого шару практично відсутня. У валків, відлитих стаціонарним способом, спад твердості перерізу починається вже з глибини 5-10 мм. Тому після кожного наступного перешліфування в таких валках знижується їхня зносостійкість, скорочується загальний термін служби та якість металопрокату.

8.1.3 Прокатні валки із високохромистого чавуну

Відома значна кількість публікацій та винаходів щодо успішного застосування для таких валків двошарових композицій з робочим шаром із високохромистого чавуну [361, 373]. Ряд зарубіжних вальцеливарних фірм з початком освоєння методу відцентрового лиття застосовують валки цього типу [364-372]. Аналіз інформаційних матеріалів показав, що на даний час провідні вальцеливарні фірми виготовляють високохромисті валки з вмістом хрому 12 - 20% та вуглецю 2,4 - 3,4%. Найчастіше концентрація кремнію в межах 0,4 - 0,6%, а марганцю 0,8 - 1,2%. У ряді випадків у такий чавун вводять нікель у кількості 0,8-3,0%.

Експлуатаційна стійкість валків з високохромистого чавуну значно вища, ніж з - хромонікелевого (4,0-4,5%Ni і 1,5%Cr) або адаміту, що пов'язано з його меншою схильністю до формування сітки розпалу, окислення, налипання окалини при прокатці, більш високої твердості в результаті формування спецкарбідів хрому типу Me_7C_3 та $Me_{23}C_6$. При використанні відцентроволитих валків із високохромистого чавуну замість звичайних хромонікель-молібденових

випуск прокату (т/валок) можна суттєво збільшити і витрати валків знизити у 1,5-2 рази [361].

Спосіб відцентрового лиття двошарових валків з робочим шаром з високохромистого чавуну забезпечує економію легуючих елементів і дозволяє легко механічно обробляти менш тверді шийки та трефи із сірого або модифікованого чавуну. Такі переваги валків з робочим шаром із високохромистого чавуну (12-18%Cr) забезпечують стійкість у чистовій групі клітей листових та широкосмугових станів на рівні 3500 - 6500 т/мм знімання робочого шару [367].

Залежно від умов експлуатації та призначення високохромисті прокатні валки виготовляють із твердістю 58-80HSD. Для забезпечення надійної роботи валків такого типу потрібно достатнє охолодження їх у кліті, не можна допускати перегрів поверхні (більше 600°C) та тривалі інтервали під час прокатки, при яких має місце сильне охолодження. Слід також враховувати можливість налипання окалини (у зв'язку з підвищеною часткою залишкового аустеніту) на валки з твердістю до 70HSD і в цьому випадку не допускати особливо великих обтискань.

8.1.4 Особливості структури і властивостей високохромистих валків

При виготовленні високохромистих валків виходять із вимог експлуатації, а рівень властивостей та зносостійкості забезпечуються оптимальним співвідношенням основних та легуючих елементів. Розглянемо вплив основних хімічних елементів у таких сплавах.

Хром є основним легуючим елементом групи зносостійких білих чавунів. Його вміст у таких сплавах може досягати 35%. В результаті легування сплавів хромом підвищується твердість, коерцитивна сила та залишкова індукція, опір корозії, жаростійкість та механічні властивості. Крім того, при збільшенні вмісту хрому в сплаві підвищується опір різним видам зношування. Легування цим компонентом дозволяє підвищити міцність чавуну у умовах експлуатації за нормальних температурах, а й після багаторазового циклічного нагріву [374].

Високохромисті чавуни мають високу окалиностійкість. Кількість хрому, що забезпечує добрий опір окисленню, визначається температурними умовами роботи. Наприклад, при температурі 700°C достатньо в сплаві 10% хрому, а при 1000°C необхідно до 20%. Чавун з 30% хрому та 1,1-3,1% вуглецю не окислюється до 1100-1150°C.

Кремній також дозволяє підвищити окалиностійкість хромистих чавунів. У чавунах, що містять більше 12% хрому, збільшення концентрації кремнію на 1% рівнозначне підвищенню вмісту хрому на 2%. Однак вміст кремнію не повинен перевищувати 2-3%. Це пояснюється збільшенням чутливості до перепаду температур під час експлуатації та, у зв'язку з цим, з можливістю утворення тріщин. Вуглець, значно впливаючи на механічні властивості, мало впливає на жаростійкість і утворення окалини в хромистих чавунах.

Механічні властивості високохромистого чавуну значною мірою визначаються вмістом хрому та вуглецю. Вони залежать, в першу чергу, від характеру карбідної фази, що формується [375]. Велика кількість твердих і тендітних включень карбідних фаз знижує пластичні властивості чавуну. Хром сильно впливає на склад карбідної фази. Він відноситься до елементів, що сприяють сильному карбідоутворенню при евтектичному перетворенні. Хром може частково замінювати атоми заліза в орторомбічному карбіді $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ або утворювати спеціальні карбіди, в яких частина його атомів заміщена залізом або іншими елементами: тригональний Me_7C_3 і кубічний Me_{23}C_6 .

За даними [376] при концентрації до 9,5% хром не помітно впливає на первинну структуру чавуну. Карбідна фаза за такого вмісту хрому представлена легованим цементитом. Білі чавуни системи Fe-C-Cr з карбідами Me_3C кристалізуються із утворенням евтектики ледебуритного типу. Будова ледебуритних колоній однаково як із 0, і при 9% хрому. Чавуни з карбідами типу Me_3C характеризуються великою схильністю до крихкого руйнування та невисокими механічними властивостями.

Хромістокарбідна евтектика утворюється при концентрації хрому більше 10%. Мікроскопічна картина затвердіння та морфологія структурних складових

при цьому змінюється, що пов'язано з появою нового типу карбідної фази. При збільшенні вмісту хрому в чавуні від 9,5 до 12% ледебурит поступово замінюється аустеніто-хромістокарбідною евтектикою. Перехід до карбіду Me_7C_3 пов'язаний з кристалізацією такої евтектики. При цьому, більшою мірою в чавунах, кристалізуються карбіди типу Me_7C_3 ніж Me_3C [361]. Евтектичні колонії $Me_7C_3 + \gamma$ є довгими голками тригонального карбіду, пов'язаними короткими перемичками. Карбіди Me_7C_3 мають виражену анізотропію властивостей. Цим зумовлено відмінність міцності та твердості за різними напрямками кристалічних ґраток карбіду. Наприклад, у зносостійкому чавуні з 15% хрому і 3% молібдену твердість карбідів становить 950HV вздовж осі у - 1500HV вздовж осі с [377]. Створення структури природного композиту в зносостійких чавунах з карбідами Me_7C_3 шляхом спрямованої кристалізації дозволило досягти для цих матеріалів міцності приблизно в 2 рази вище, ніж при звичайній такого ж складу і це може бути забезпечено відцентровим литтям робочого шару листопрокатних валків. За результатами досліджень можна припустити, що максимальними властивостями міцності і службовими повинні мати чавуни з концентрацією $Cr = 17-21\%$.

Це обумовлюється високою міцністю та пластичністю металевої основи, у складі якої є включення метастабільного аустеніту. Такий чавун у складі евтектики містить, крім аустеніту, тригональний карбід Me_7C_3 – найстійкіший і найтвердіший серед існуючих у залізовуглецевих сплавах. Разом з тим, такий чавун матиме підвищену схильність до викрошування в процесі експлуатації. У литому стані такі сплави можуть представляти трифазну систему [376]: α -твердий розчин, що складається з δ -фериту та продуктів перетворення аустеніту (мартенсит, α -ферит) + γ -твердий розчин (залишковий метастабільний аустеніт) + карбідна фаза (евтектичні, первинні та вторинні). Наявність у сплаві продуктів розпаду аустеніту характерна для структури товстостінних виливків, що обумовлено уповільненою швидкістю охолодження. Присутність δ -фериту, наявність якого зменшує зносостійкість сплаву, у структурі металевої основи можлива у виливках з різною товщиною стінки та пояснюється неоднорідністю

рідкого розплаву за реальних умов промислової плавки.

Питання щодо найбільш сприятливого, з погляду зносостійкості, розташування карбідів Me_7C_3 стосовно зношуваної поверхні розглянуто у ряді робіт. За даними [378], зносостійкість чавуну 300X20ДНФ при розташуванні осі с карбідів Me_7C_3 перпендикулярно робочій поверхні приблизно в 3 рази вище, ніж при паралельному та в 1,5 рази вище, ніж при неорієнтованому розташуванні карбідів. З розглянутих публікацій випливає, що застосовуючи високохромисті чавуни, в яких карбідна фаза цементитного типу заміщається спеціальними карбідами типу Me_7C_3 і Me_{23}C_6 , за умови чітко вираженої спрямованої кристалізації можна істотно підвищити зносостійкість виробів (рис.1). При виробництві масивних виливків, таких як валки прокатних листових і широкосмугових станів, здійснити спрямовану кристалізацію при формуванні робочого шару можливо, використовуючи тільки метод відцентрового лиття [361].

Твердість карбідів типу Me_3C і Me_7C_3 залежить від концентрації хрому і досягає 800-1000HV та 1300-1800HV відповідно [379]. Зі збільшенням концентрації хрому вона зростає. Залежність твердості від концентрації хрому у разі карбідів Me_3C виражена значно сильніше, ніж у випадку карбідів Me_7C_3 . Найважливішу роль грають розміри структурних складових. При зменшенні розмірів евтектичних колоній і надлишкових фаз суттєво підвищуються характеристики міцності чавунів.

В γ -залізі хром має необмежену розчинність, а в α -залізі розчиняється його до 12% [380]. Зміст хрому в аустеніті зростає зі збільшенням його частки в чавуні за лінійним законом. Кількість карбідів визначається, головним чином, вмістом вуглецю, а тип карбідів – концентрацією хрому. Однак, при одній і тій же концентрації вуглецю кількість карбідів підвищується при збільшенні концентрації хрому. За даними досліджень [381] у чавунах із вмістом хрому 18-24% (при 2,8-3,2% вуглецю) кристалізується максимальна кількість карбідів Me_7C_3 (концентрація хрому в цих карбідах становить 35-40%) за відсутності заевтектичних карбідів, що забезпечує отримання високих властивостей

міцності. При меншому вмісті хрому в чавуні карбіди збіднені хромом, що призводить до зниження їх механічних властивостей. Крім того, внаслідок ліквідації можливе утворення карбідів типу Me_3C , які за міцністю значно поступаються карбідам Me_7C_3 . При більшому вмісті хрому і вуглецю в структурі чавуну спостерігається поява крихких голок заевтектичних карбідів, внаслідок чого очікується погіршення властивостей чавуну. Починаючи з 18-20% вмісту хрому, поряд з карбідами Me_7C_3 виділяються і Me_{23}C_6 .

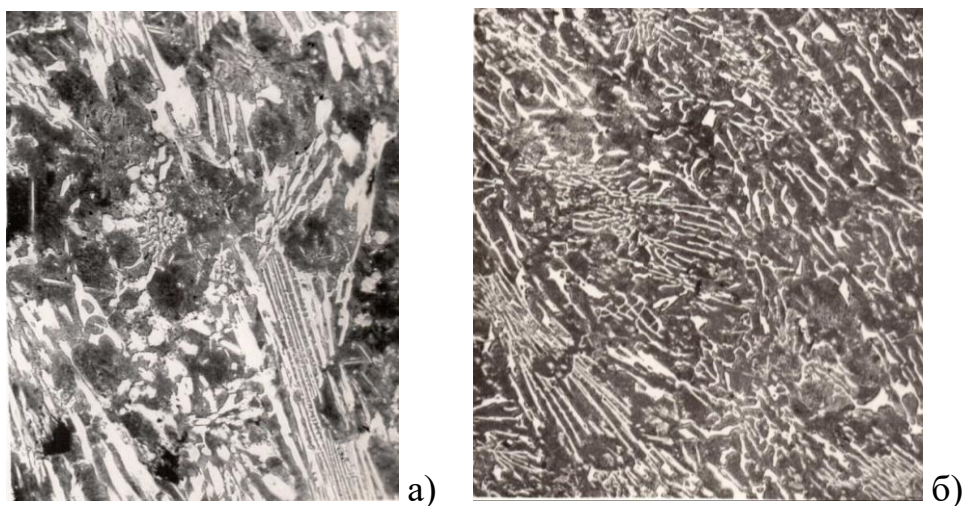


Рисунок 1 - Структура робочої поверхні високохромистого валка: а) стаціонарнолитого виливка (видні включення точкового графіту); б) – відцентроволитого

Службові властивості білих чавунів залежать не тільки від кількості та типу карбідів, а й від структури металевої матриці. Її вплив на властивості хромистих чавунів розглянуто в [382]. При постійному вмісті вуглецю зі збільшенням концентрації хрому рівень твердості металу підвищується. Це пов'язано зі зростанням стійкості аустеніту зі збільшенням вмісту хрому в чавуні (від 12,5 до 20%). Внаслідок цього кількість продуктів розпаду у структурі зменшується. Аналіз результатів дослідження високохромистих чавунів з різною структурою металевої основи за однакових характеристик карбідної фази показав, що зносостійкість зростає лінійно з підвищенням твердості металевої матриці. Вона значно м'якша за масивні карбіди, тому, незважаючи на їх високу твердість, має місце і її знос за рахунок викришування карбідів і дряпання

матеріалу металевої матриці. Цей тип зношування визначається механічними властивостями матеріалу матриці. Якщо основа не має достатньої твердості, то карбіди з поверхні можуть викришуватися, не реалізуючи своєї високої зносостійкості. Висока зносостійкість є необхідною, але не достатньою умовою працездатності валків, тому при виборі складу чавуну слід враховувати його характеристики міцності, схильність до викришування. У роботах [361, 383, 384] наголошується, що міцність монотонно підвищується із зменшенням вмісту вуглецю, а хром, починаючи з 15%, практично не впливає на неї.

Прогартуваність для білих чавунів є важливою технологічною та службовою властивістю. Зі зміною вмісту вуглецю в чавуні змінюється концентрація хрому в металевій матриці, що впливає на прогартуваність. При легуванні лише хромом неможливо отримати високий рівень властивостей у виливках. Щоб отримати необхідне співвідношення структурних складових та задані властивості карбідної фази, подрібнити зерно, вводять додаткові легуючі домішки та модифікатори. Механічні та службові властивості виливків значною мірою залежать від розподілу легуючих елементів між фазами чавуну. Для отримання високої прогартуваності необхідно вводити елементи, що розширюють γ - область і збільшують стійкість аустеніту, наприклад, Mo, Ni, Mn. Зі зменшенням вмісту вуглецю позитивний вплив цих легуючих елементів на прогартуваність зростає, що пов'язано з особливостями їх розподілу між карбідами і металевою матрицею. Найбільш повне уявлення про вплив хімічного складу матеріалу на структуру можна отримати при аналізі ролі основних та легуючих домішок у кожному конкретному випадку.

У процесі кристалізації чавуну відбувається перерозподіл хрому. Більшість його входить до складу карбідної фази. Міжфазовий розподіл хрому у високолегованих чавунах мало вивчений. За даними [385] коефіцієнт розподілу між карбідами типу Me_3C і аустенітом дорівнює 2.6, між карбідами Me_7C_3 і аустенітом – 4.2. Вміст хрому в карбіді Me_7C_3 може змінюватись у широких межах (табл. 1).

Таблиця 1- Вміст хрому в карбіді Me_7C_3 в залежності від загальної концентрації

Вміст хрому в карбіді Me_7C_3 , %	Загальний вміст хрому в чавуні, %
26,2	10,5
39,1	18,0
46,8	24,6
53,7	28,5

У ряді робіт [386 ,387] розглянуто питання щодо ступеню неоднорідності розподілу елементів у матриці високохромистих сплавів. Розподіл елементів значно різниться у центрі зерна первинного аустеніту та вздовж евтектичних карбідів. Вздовж поверхні розділу різко зменшується вміст хрому та вуглецю, а також підвищується концентрація кремнію, фосфору та сірки. Необхідно також враховувати, що і при відцентровому литті можлива ліквідація хімічних елементів, що залежить від частоти обертання виливниці. За даними [361] найменша хімічна та структурна неоднорідність забезпечується при частоті обертання форми при кристалізації понад 380 об/хв.

Умови кристалізації впливають на первинну структуру високохромистих чавунів. Найбільш значущий фактор – швидкість охолодження. Діапазон швидкостей охолодження реальних виливків в інтервалі кристалізації становить 0,2-200°C/хв. Швидкість охолодження впливає як на ступінь диференціювання структури в евтектиці і розмір евтектичних колоній (внаслідок зональної і дендритної ліквідації елементів), так і на дислокаційну структуру. Встановлено, що більша швидкість кристалізації відповідає робочому шару валка, а низька характерна для центральної зони. При високих швидкостях охолодження чавуну може спостерігатися розтріскування, пов'язане з виникненням поверхневих напружень, незважаючи на те, що розтріскування може носити локальний мікроскопічний характер, воно збільшує схильність до викришування та руйнування деталей при їх експлуатації.

8.1.5 Оцінка напруженого стану у масивних виливках прокатних валків при кристалізації чавуну та впливу різних факторів на його величину

Для підвищення експлуатаційної стійкості чавунних прокатних валків важливо провести оцінку термічних напружень, що виникає при їх кристалізації. Причиною виникнення напружень є нерівномірний розподіл температур перерізу масивної виливки при її охолодженні. Внаслідок цього та неодночасного протікання структурних перетворень, виникають напруження при кристалізації чавунних масивних виливків, що впливають на формування структури та рівень твердості у виробі. Враховуючи жорсткі вимоги до експлуатаційних характеристик прокатних валків, що включають, насамперед, високу зносостійкість та твердість контактної поверхні, необхідно правильно коригувати кінетику зміни температури у виробі під час охолодження. Для підвищення експлуатаційної стійкості чавунних прокатних валків важливо провести оцінку температурних полів та напружень, що виникають в процесі їх кристалізації. Оскільки експериментальні методи визначення напруженого стану в тілі масивних виливків при кристалізації чавуну утруднені через складність та дорожнечу проведення експериментів, запропоновано методику теоретичного визначення технологічних параметрів кристалізації, яка дозволяє оцінити напружений стан виливку [388]. Математичну модель термомеханічних процесів, що виникають під час кристалізації чавунного валка, з розрахунком температурного поля та напружено-деформованого стану, будували на основі теорії пластичності Прандтля – Рейса.

8.1.5.1 Моделювання температурних полів системи виливка – ливарна форма в період кристалізації валка

У внутрішніх точках координат розподіл температури підпорядковується одновимірному рівнянню теплопровідності, яке для тіл з осьовою симетрією (до них відносяться і прокатні валки) зручно записати в циліндричній системі координат. Це рівняння у частинних похідних має вигляд

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

де r -радіус (координата) впродовж товщини виливка й кокілю, м; τ —час, год.; $T = T(r, \tau)$ - температура в точках з координатою r в момент часу τ , $^{\circ}\text{C}$; c - питома теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; λ - теплопровідність матеріалу, $\text{кДж}/(\text{м}\cdot\text{год}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Баланс тепла при фазових переходах враховували змінами питомої теплоємності (272 кДж/кг) в інтервалі між температурами ліквідус і солідус

$$c = \begin{cases} c_g & T > t_l \\ \frac{c_g + c_{lv}}{2} + \frac{272}{t_l - t_s} & t_s \leq T \leq t_l \\ c_{lv} & T < t_s \end{cases} \quad (2)$$

де $c_g = 0,92 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; $c_{lv} = 0,84 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; $t_s = 1150^{\circ}\text{C}$ - температура солідус чавуну; $t_l = 1250^{\circ}\text{C}$ - температура ліквідус чавуну.

В інтервалі температур аналізованих фазових перетворень ($770\text{-}756^{\circ}\text{C}$) при кристалізації чавуну також виділялося 84 кДж/кг . У цьому проміжку змінювалася теплоємність чавуну [389]:

$$c = \begin{cases} c_{lv} & t_{l1} < T < t_s \\ c_{lv} + \frac{84}{t_{l1} - t_{s1}} & t_{s1} \leq T \leq t_{l1} \\ c_{lv} & T < t_{s1} \end{cases} \quad (3)$$

де $t_{l1} = 770^{\circ}\text{C}$ - та $t_{s1} = 756^{\circ}\text{C}$ - температури початку та завершення фазових перетворень чавуну; γ - щільність чавуну, кг/м^3 :

$$\gamma = \begin{cases} 6900 & T > t_l \\ \frac{6900 + 7200}{2} = 7050 & t_s \leq T \leq t_l \\ 7200 & T < t_s \end{cases} \quad (4)$$

Теплопровідність в залежності від температури розраховували [389]:

$$\lambda = 45 - 25 \cdot (1200 - T) / 1200 \quad (5)$$

Удельная теплоемкость материала кокиля принимали равной $0,67 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Розрахунок температурного поля у виливку проводили у два етапи. На першому - оцінювали градієнт температур за радіусом у кожний момент часу для виливки та кокілю. На другому етапі за відомим заздалегідь часом вилучення виливки з кокіля розрахунок градієнта температур виробляли тільки для

виливки. Незалежно від радіусу виливки розрахунок розподілу у ній температур виробляли до 400 год включно (кінця кристалізації).

На першому етапі розрахунок теплопровідності для виливки та кокілю були представлені у вигляді диференціальних рівнянь:

$$c\gamma \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r_1^2} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r_1} \right) \quad (6)$$

$$c\gamma \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r_2^2} + \frac{1}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r_2} \right) \quad (7)$$

$$0 \leq r_1 \leq r_o$$

$$r_o < r_2 \leq r_o + h_k,$$

де $T_1 = T_1(r_1, \tau)$ - температура відливка, °C; $T_2 = T_2(r_2, \tau)$ - температура кокілю, °C;
 r_o - радіус відливка, м; h_k - товщина кокілю, м.

Під час розрахунку температури було обрано такі початкові умови:

$$T_1(r_1, 0) = T_z, \quad (8)$$

де T_z - температура чавуну перед розливанням в кокіль.

$$T_2(r_2, 0) = T_k, \quad (9)$$

де T_k - температура кокілю перед розливанням чавуну.

Граничні умови.

Відсутність у центрі виливка теплового потоку (умова симетрії)

$$\lambda \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial r_1} = 0 \quad (10)$$

Наявність підживлення рідким металом із прибутку до завершення кристалізації на досить малому інтервалі біля центру виливка:

$$T_1(0, \tau) = t_s \quad (11)$$

Після закінчення кристалізації приймали попередню умову симетрії. Як рівняння для щільності приймали:

$$\frac{\partial(\rho \Delta T)}{\partial \tau} = \gamma \frac{\partial \Delta T}{\partial r}, \quad (12)$$

де τ - час; r - радіус; ρ - щільність; ΔT - різниця температур у сусідніх точках розрахункової області; γ - поправочний коефіцієнт.

Рівняння відповідає температурам між ліквідусом та солідусом. На внутрішній межі кокіля ($r = r_o$), де практично відразу виникає зазор між виливком і кокілем, тепловий потік виражали через теплове випромінювання:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 3.8 \left[\left(\frac{T_1(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 \right],$$

(13)

де 3.8 - розмірний коефіцієнт, що залежить від питомої теплоємності та коефіцієнта чорноти, що приймається рівним 0,7-0,8.

На зовнішній межі кокілю рівняння теплового потоку має вигляд:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 3.8k \left[\left(\frac{T_2(r_o + h_k, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

(14)

де T - температура на зовнішній межі; T_{cp} - температура навколишнього середовища (прийняли 30°C); 3.8 - розмірний коефіцієнт, що залежить від питомої теплоємності та коефіцієнта чорноти, що приймається рівним 0,7-0,8; k - коефіцієнт конвективного теплообміну ($k = 2$).

На другому етапі розрахунку розподілу температур використовували рівняння теплопровідності, що мало вигляд:

$$c\gamma \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r_1^2} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r_1} \right)$$

(15)

де $0 \leq r_1 \leq r_o$, $T_1 = T_1(r_1, \tau)$ - температура відливка, °C; r_o - радіус відливка, м.

Початковою умовою при розрахунку приймали температуру виливка перед вилученням її з кокілю.

Граничні умови.

У центрі виливки приймали відсутність теплового потоку (або умову симетрії):

$$\lambda \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial r_1} = 0$$

(6)

На зовнішній межі виливка рівняння теплового потоку виразили:

$$\lambda \frac{\partial T_1}{\partial r_1} = 3.8k \left[\left(\frac{T_1(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

(17)

де $T_1(r_o, \tau)$ - температура на зовнішній межі; T_{cp} - температура навколишнього середовища (прийняли 30°C); 3,8 - 3.8 - розмірний коефіцієнт, що залежить від питомої теплоємності та коефіцієнта чорноти, що приймається рівним 0,7-0,8; k - коефіцієнт конвективного теплообміну ($k = 2$).

Задачу (1) вирішували методом скінченних різниць за явною різницевою схемою. Для теоретичного розрахунку поставленої задачі було використано графічне представлення моделі для виділення елемента системи виливок – ливарна форма (рис.2).

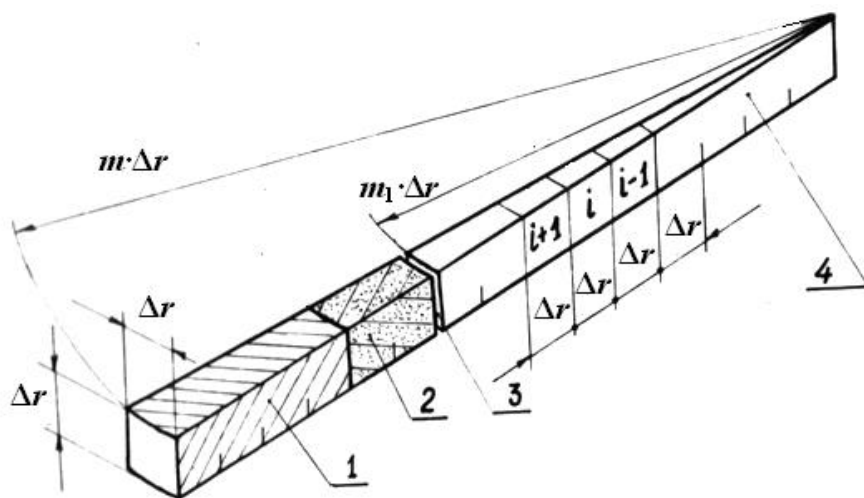


Рисунок 2 - Розрахункова схема одновимірної задачі: 1 – циліндр; 2 – теплоізоляційне покриття; 3 – повітряний проміжок; 4 – валик.

Для цього область рішення було розбито m точками на $m-1$ рівних частин (див. рис. 2). Індекс i відноситься до i -ї точки області. Час, що відноситься до температури, приведено в скобках. Радіусу виливка (r_o) відповідає m_1 точок.

Крок за координатою Δr задано як:

$$\Delta r = \frac{L}{m-1}, \quad (18)$$

де L – довжина досліджуваної області, мм. Координата в i -й точці області:

$$r_i = r_o + (i-1)\Delta r \quad (19)$$

Крок по часу $\partial \tau$ приблизно дорівнює величині $\Delta \tau$, що вибирається із умов стійкості різницевої схеми, де максимум береться з усієї сукупності точок за i :

$$\max\left(\frac{\lambda_i \Delta \tau}{c_i \gamma_i \Delta r^2}\right) < 1 \quad (20)$$

Відповідно (19), знаходимо

$$\Delta \tau < \min\left(\frac{c_i \gamma_i}{\lambda_i}\right) \cdot \Delta r^2 \quad (21)$$

Тоді рівняння (1) для точки с номером i в скінчено-різницевій формі є:

$$c_i \gamma_i \frac{T_i(\tau + \Delta \tau) - T_i(\tau)}{\Delta \tau} = \lambda_i \left[\frac{T_{i+1}(\tau) - 2T_i(\tau) + T_{i-1}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1}(\tau) - T_{i-1}(\tau)}{2r_i \Delta r} \right] \quad (22)$$

З рівняння (22) за відомими значеннями $T_i(\tau)$ в попередній момент часу знаходили $T_i(\tau + \Delta \tau)$ - в наступній момент часу за формулою:

$$T_i(\tau + \Delta \tau) = T_i(\tau) + \frac{\lambda_i \Delta \tau}{c_i \gamma_i} \left[\frac{T_{i+1}(\tau) - 2T_i(\tau) + T_{i-1}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1}(\tau) - T_{i-1}(\tau)}{2r_i \Delta r} \right] \quad (23)$$

Попередньо $T_i(\tau)$ задавали із вихідної умови.

Рішення задачі (6)-(14) скінчено-різницевим способом. Вихідна умова:

$$T_{1i}(0) = T_z \text{ для } 1 \leq i \leq m_1 \quad (24)$$

$$T_{2i}(0) = T_k \text{ для } m_1 + 1 \leq i \leq m \quad (25)$$

Розрахунок за (23) для T_{1i} проводили в точках $2 \leq i \leq m_1 - 1$, а для T_{2i} - в точках $m_1 + 2 \leq i \leq m - 1$. Для точки $i=2$ (центр виливка) в силу умови симетрії (10):

$$T_{1i-1} = T_{12-1} = T_{12} \quad (26)$$

Рівняння (23) приймає вигляд:

$$T_{12}(\tau + \Delta \tau) = T_{12}(\tau) + \frac{\lambda_2 \Delta \tau}{c_2 \gamma_2} \left[\frac{T_{13}(\tau) - 2T_{12}(\tau) + T_{12}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{13}(\tau) - T_{12}(\tau)}{2r_2 \Delta r} \right] \quad (27)$$

Координата в точці $i=2$ дорівнює:

$$r_2 = (i - 1)\Delta r = (2 - 1)\Delta r = \Delta r \quad (28)$$

Розрахунок граничної умови (13) для T_{1i} в точці $i = m_1 - 1$ (межа виливка з кочілем). Позначимо праву частину формули (13) через q_1 :

$$q_1 = 3.8 \left[\left(\frac{T_1(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(r_o, \tau) + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (29)$$

В скінчено-різницевого вигляді ця формула:

$$q_1 = 3.8 \left[\left(\frac{T_{1m_1-1}(\tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{2m_1+2}(\tau) + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (30)$$

За допомогою формули (30) можна розрахувати значення q_1 на попередньому кроку за часом. Оскільки для температури T_{1m_1-1} умова (13) в скінчено-різницевого вигляді є:

$$\lambda_{m_1-1} \frac{T_{1m_1-1} - T_{1m_1}}{\Delta r} = q_1,$$

(31)

$$\text{то} \quad T_{1m_1} = T_{1m_1-1} - \frac{q_1 \Delta r}{\lambda_{m_1-1}}, \quad (32)$$

розраховане значення для T_{1m_1} підставляємо в різницеву формулу (23) замість $T_{i+1}(\tau)$ та отримуємо:

$$T_{1m_1-1}(\tau + \Delta \tau) = T_{1m_1-1}(\tau) + \frac{\lambda_{m_1-1} \Delta \tau}{c_{m_1-1} \gamma_{m_1-1}} \left[\frac{T_{1m_1-1}(\tau) - \frac{q_1 \Delta r}{\lambda_{m_1-1}} - 2T_{1m_1-1}(\tau) + T_{1m_1-2}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{1m_1-1}(\tau) - \frac{q_1 \Delta r}{\lambda_{m_1-1}} - T_{1m_1-2}}{2r_{m_1-1} \Delta r} \right] \quad (33)$$

$$r_{m_1-1} = (m_1 - 2) \Delta r \quad (34)$$

Оскільки для температури T_{2i} по радіусу r_{m_1+2} умова (13) в скінчено-різницевого вигляді є:

$$\lambda_{m_1+2} \frac{T_{2m_1+1} - T_{2m_1+2}}{\Delta r} = q_1, \quad (35)$$

отримали

$$T_{2m_1+1} = T_{2m_1+2} + \frac{q_1 \Delta r}{\lambda_{m_1+2}}, \quad (36)$$

Це значення для T_{2m_1+1} підставляємо в різницеву формулу (23) замість $T_{i-1}(\tau)$:

$$T_{2m_1+2}(\tau + \Delta\tau) = T_{2m_1+2}(\tau) + \frac{\lambda_{m_1+2}\Delta\tau}{c_{m_1+2}\gamma_{m_1+2}} \left[\frac{T_{2m_1+3}(\tau) - 2T_{2m_1+2}(\tau) + T_{2m_1+1}(\tau) + \frac{q_1\Delta r}{\lambda_{m_1+2}}}{\Delta r^2} + \frac{T_{2m_1+3}(\tau) - T_{2m_1+2}(\tau) - \frac{q_1\Delta r}{\lambda_{m_1+2}}}{2r_{m_1+2}\Delta r} \right] \quad (37)$$

$$r_{m_1+2} = (m_1 + 1)\Delta r \quad (38)$$

Урахування граничної умови (14) для T_{2i} в точці $i = m - 1$ (зовнішня межа кокілю). Позначимо праву частину формули (14) через q_2

$$q_2 = 3.8k \left[\left(\frac{T_{2m-1}(R_o + h_k, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (39)$$

Розрахунок значення q_2 можна провести на попередньому кроку за часом

Для T_{2m} умова (14) скінчено-різницевого вигляді є

$$\lambda_{m-1} \frac{T_{2m-1} - T_{2m}}{\Delta r} = q_2, \quad (40)$$

отримуємо

$$T_{2m} = T_{2m-1} - \frac{q_2\Delta r}{\lambda_{m-1}} \quad (41)$$

Температуру на зовнішній межі приймали рівну в перед граничній точці при розбитті області рівномірні сітки. Отримане значення для T_{2m} підставляли в різницеву формулу (23) замість $T_{i-1}(\tau)$:

$$T_{2m-1}(\tau + \Delta\tau) = T_{2m-1}(\tau) + \frac{\lambda_{m-1}\Delta\tau}{c_{m-1}\gamma_{m-1}} \left[\frac{T_{2m-1}(\tau) - \frac{q_2\Delta r}{\lambda_{m-1}} - 2T_{2m-2}(\tau) + T_{2m-3}(\tau)}{\Delta r^2} + \frac{T_{2m-1}(\tau) - \frac{q_2\Delta r}{\lambda_{m-1}} - T_{2m-2}(\tau)}{2r_{m-1}\Delta r} \right], \quad (42)$$

де координата точки $i=m-1$ (зовнішня межа кокіля) дорівнює:

$$r_{m-1} = (m - 2)\Delta r \quad (43)$$

На другому етапі розв'язання задачі (15)-(17) скінчено-різницеvim методом проводили обчислення аналогічно - першому. У цьому випадку розрахунки виконували тільки для виливка.

8.1.5.2 Моделювання одновимірної задачі напружено-деформованого стану в процесі кристалізації валка

Побудову математичної моделі напружено-деформованого стану (НДС) проводили, використовуючи модель пластичності, що описує поведінку матеріалу при пружно-пластичних деформаціях (пружне середовище при

навантаженні та жорстко-пластичне - після розвантаження).

Розрахунок НДС проводили в геометрично лінійній постановці. Він ґрунтується на фізичному принципі мінімуму роботи потенційної енергії за умови відсутності зовнішніх сил. Тому мінімізацію роботи деформації проводили лише з внутрішніх сил:

$$A = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i \sigma_i v_i, \quad (44)$$

де ε_i - деформація та σ_i - напруження в i -м перерізі; v_i - об'єм елемента (сектора циліндра) в i -м перерізі. В безперервному випадку сума (44) є інтегралом по об'єму. Радіус виливка r_0 поділено m_1 точками на m_1-1 рівних частин з кроком

$\Delta r = \frac{r_0}{m_1 - 1}$. Індекс i відноситься до i -ї точки радіуса (див. рис.2). Координата в i -

й точці області розраховується за формулою:

$$r_i = (i - 1)\Delta r$$

(45)

З геометричних міркувань об'єм виділеного i -го елемента було представлено:

$$v_i = (r_{i+1}^2 - r_i^2)l = [(i+1)^2 - i^2] \frac{r_0^2}{(m-1)^2} l = (2i+1) \frac{r_0^2}{(m-1)^2} l, \quad (46)$$

де l - довжина вздовж осі виливки, приймається $l=1$ мм.

У представленій моделі НДС деформації складаються із двох складових: деформації навантаження та деформації розвантаження. Причому навантаження і розвантаження відбуваються одночасно: після застосування деформацій навантаження відразу розвантажуються ті з них, які перевершують гранично пружну деформацію матеріалу, в результаті чого у виділеному елементі залишаються залишкові напруження і відбувається зміна його лінійних розмірів. Зміна довжини вздовж радіусу виливки i -го розрахункового елемента, що спричинена деформацією матеріалу внаслідок нерівномірності теплового поля, за вибраний період $\Delta \tau$ знаходили за формулою:

$$\Delta r_i = \Delta r \cdot [T_i(\tau + \Delta \tau) - T_i(\tau) - \Delta T_{\text{н\delta}}] \beta,$$

(47)

де $T_i(\tau + \Delta\tau)$ - температура i -го перерізу в даний момент часу $\tau + \Delta\tau$; $T_i(\tau)$ - температура i -го перерізу в попередній момент часу τ ; $\Delta T_{\text{ср}}$ - середнє збільшення температури, °С, при якому досягається мінімум роботи деформації; β - коефіцієнт лінійного розширення, для чавуну $\beta = 11 \cdot 10^{-6}$, °С⁻¹;

У роботі використовували підхід до розв'язання задачі, при якому представляли повну деформацію навантаження у i -му перерізі у вигляді суми:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta r_i}{\Delta r} + \varepsilon_{oi} + \varepsilon_{ci}, \quad (48)$$

де перший доданок у правій частині цього виразу є збільшення деформації за обраний період розрахунку $\Delta\tau$; ε_{oi} - залишкова деформація в момент часу τ на попередньому етапі розрахунку; ε_{ci} - структурна деформація в момент часу $\tau + \Delta\tau$. Граничними умовами було прийнято $T_i(\tau + \Delta\tau) < 770^\circ\text{C}$ и $T_i(\tau) < 770^\circ\text{C}$.

Параметром, що варіюється, є число $\Delta T_{\text{ср}}$. Значення $\Delta T_{\text{ср}}$ визначали з умови мінімуму роботи деформацій шляхом її зміни від ΔT_{min} до ΔT_{max} із досить малим кроком пошуку 0.1°C . Для зменшення машинного часу розрахунку проміжок варіювання змінювали залежно від максимальної температури. На початку, у момент заливання металу в кокіль, приймали $\Delta T_{\text{max}} = 100^\circ\text{C}$. Але оскільки за період часу до вилучення виливка з кокілю температура на поверхні різко змінюється, були відкориговані значення параметра ΔT_{max} : через 40 год приймали $\Delta T_{\text{max}} = 25^\circ\text{C}$, а через 200 год - $\Delta T_{\text{max}} = 12,5^\circ\text{C}$.

Структурну деформацію ε_{ci} за час розглянутих фазових перетворень, відповідно інтервалу температур $770-756^\circ\text{C}$, враховували в кожній точці i один раз при $T_i(\tau) \geq 756$, а $T_i(\tau + \Delta\tau) < 756$. В цей момент її приймали однаковою з граничною пружною деформацією ε_{02} : $\varepsilon_{ci} = \varepsilon_{0.2}$. В інші моменти часу, виключаючи зазначений, $\varepsilon_{ci} = 0$. Відповідно до закону Гука для аналізованої моделі напружень навантаження в i -му перерізі можна подати у вигляді:

$$\sigma_i = E(T_i)\varepsilon_i, \quad (49)$$

де $E(T_i)$ - модуль пружності, МПа, що залежить від температури і розрахований

за емпіричною формулою [390]:

$$E(T_i) = 2,3023 \cdot 10^5 - 3,706 \cdot 10^{-2} \cdot T_i - 8,92 \cdot 10^{-4} \cdot T_i^2; \quad (50)$$

T_i - середня температура в i -й точці за час від τ до $\tau + \Delta\tau$, тобто

$$T_i = \frac{T_i(\tau) + T(\tau + \Delta\tau)}{2} \quad (51)$$

В основі розрахунку залишкових деформацій є припущення, що через нерівномірність теплового поля одночасно з деформацією навантаження відбувається деформація розвантаження. Якщо деформація перевищує гранично пружну деформацію, вона приймається рівної їй. На наступному етапі навантаження отримані залишкові деформації додавалися до значення ε_i , розрахованому за (48).

Залишкові деформації розраховували так, якщо при знайдених подовженнях Δr_i розрахункового елемента величина:

$$|\varepsilon_i| \leq \varepsilon_{0.2}, \text{ то } \varepsilon_i = \varepsilon_{0.2};$$

$$\text{в протилежному випадку, якщо: } |\varepsilon_i| > \varepsilon_{0.2}, \text{ то } \varepsilon_{oi} = \varepsilon_{0.2} \cdot \frac{\varepsilon_i}{|\varepsilon_i|},$$

$$(52)$$

(розвантаження до гранично пружної деформації), де $\varepsilon_{0.2}=0,001$ - величина гранично пружної деформації для чугунов.

Залишкові напруження σ_{oi} при розвантаженні, відповідно визначеним деформаціям, розраховували за формулами:

$$\sigma_i, \text{ якщо } |\varepsilon_i| \leq \varepsilon_{0.2}$$

$$\sigma_{oi} = \varepsilon_{0.2} \cdot E_i \cdot \frac{\sigma_i}{|\sigma_i|}, \text{ якщо } |\varepsilon_i| > \varepsilon_{0.2} \quad (53)$$

За алгоритмом розробленої програми, рішення розглянутих задач відбувалися наступним чином.

На першому етапі математичного моделювання НДС вирішували завдання розрахунку температурних полів, що виникають у системі виливок – ливарна форма. Було два масиви температур $T_i(\tau)$ и $T_i(\tau + \Delta\tau)$. Спочатку, даними, розрахованими за формулами (24), (25), заповнювали масив $T_i(\tau)$. Потім, за

формулою (23) з урахуванням граничних умов, розраховували масив $T_i(\tau + \Delta\tau)$. Далі масиву $T_i(\tau)$ надавали значення масиву $T_i(\tau + \Delta\tau)$.

На другому етапі моделювання проводили оцінку напруженого стану, що виникає в процесі кристалізації виливка. Згідно принципу мінімуму роботи деформації (44), та з урахуванням отриманих на першому етапі обчислень масивів температурних полів, за формулами (48) та (49) розраховували масиви деформацій та напружень навантаження у момент часу τ . Далі за формулами (52), (53) заповнювали масиви залишкових деформацій та напружень у момент часу τ . З урахуванням цих отриманих масивів залишкових деформацій на наступному етапі навантаження розраховували масиви деформацій та напружень у момент часу $\tau + \Delta\tau$ за формулами (48) и (49). Алгоритм повторювали задану кількість разів.

Використовуючи розроблені математичні моделі, виконано 42 варіанти розрахунків щодо вирішення одновимірної задачі з НДС. Об'єктом дослідження є відцентроволиті листопрокатні чавунні валки $\varnothing 1060$ мм і 800 мм. Величини теплофізичних констант, використаних для розрахунку, наведені в табл.2.

Таблиця 2 - Величина теплофізичних констант системи валок-кокіль

Параметри	Значення констант або розрахункова формула
Температура ліквідусу чавуну	1250°C
Температура солідусу чавуну	1150°C
Температура початку перлітного перетворення	770°C
Температура кінця перлітного перетворення	756°C
Теплоємність рідкого чавуну	0,92 кДж/кг°C
Теплоємність валкового чавуну	0,84 кДж/кг°C
Теплоємність матеріалу кокілю	0,63 кДж/кг°C
Теплоємність намазування кокілю	1,09 кДж/кг°C
Теплота кристалізації чавуну	271,7 кДж/кг
Теплота фазового перетворення чавуну валка	83,6 кДж/кг
Коефіцієнт теплопровідності чавуну в інтервалі кристалізації	62,7 кДж/м×год°C

Продовження таблиці 2

Коефіцієнт теплопровідності чавуну кокілю	$K=(45-40) \times T/1150$
Коефіцієнт теплопровідності намазки	5,02 кДж/м×год°С
Питома вага чавуну у твердому стані	7200 кг/м ³
Питома вага чавуну в рідкому стані	6900 кг/м ³
Питома вага матеріалу намазки кокілю	1600 кг/м ³

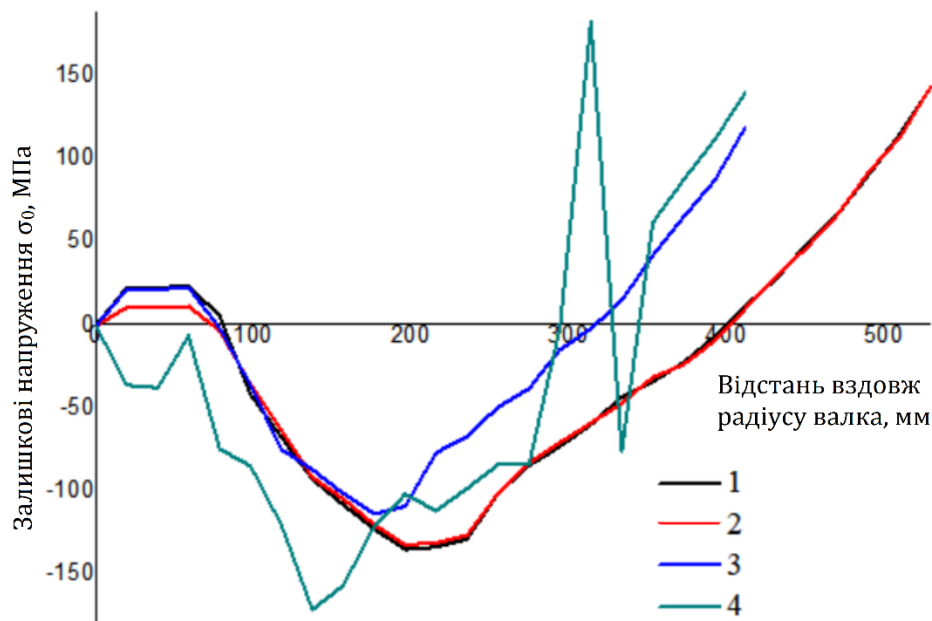


Рисунок 3 Залишкові напруження (І роду) по перерізу валків для варіантів розрахунку (відповідно даних табл.3, виділено сірим кольором) №15 (1 і 2) і №38 (3 і 4) у різні моменти часу (τ), при $\Delta\tau = 0,4\text{с}$ (табл. 4): 1- τ_1 , 2- τ_3 , 3- τ_1 , 4- τ_2 .

В табл. 3 наведено дані розрахунку одновимірної задачі НДС, на рис.3 - схема утворення залишкових напружень σ_{0i} при кристалізації в поперечному перерізі валка у фіксовані моменти часу τ (табл. 4) на прикладі двох варіантів розрахунку (див. табл. 3, №№15 та 38). По осях: абсцис відкладена відстань вздовж радіуса валка i -го розрахункового елемента (r_i), мм; ординат – величина залишкового напруження, МПа. На графіках стискаючі напруження показані зі знаком "-", а розтягуючі – "+".

Аналіз ливарних залишкових напружень, показав, що максимальні стискаючі залишкові напруження (див. рис. 3) спостерігаються на половині довжини радіусу, тоді як максимальні розтягуючі - поблизу робочої поверхні валків. Встановлено, що для виливків з меншим діаметром (рис.3, графіки 3 і 4)

спостерігається більший розкид значень залишкових напружень по перерізу валка у міру охолодження виливка. Такий розподіл залишкових напружень (І роду) по перерізу валка вимагає їх обліку при призначенні параметрів термічної обробки. Головним є призначення ступеня витримки виливка задля забезпечення повільного процесу його рівномірного прогріву.

Оцінку впливу на НДС прокатних валків діаметром 800мм та 1060мм різних параметрів при кристалізації проведено шляхом виконання статистичної обробки вибірки валків (42 шт., деякі приклади див. табл.3). Як змінні були обрані: товщина кокілю, температура кокілю перед розливом і температура металу, що розливається у форму, час охолодження валка у формі. Результати множинного кореляційного аналізу показали існування між товщиною кокілю, температурою металу, що розливається у форму, вихідною температурою кокілю, часом охолодження валка у формі і напружено-деформованим станом після кристалізації валка лінійного зв'язку.

Залишкові напруження (І роду) розтягування зовнішнього шару ($\sigma_{\text{ост.розт.}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{ост.розт.}} = 492,4 + 0,07h_{\text{кок}} - 1,9\tau_{\text{вийм}} - 1,8t_{\text{розл}} - 0,14t_{\text{кок}}, R=0,76 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$\sigma_{\text{ост.розт.}} = 11,7 - 0,003h_{\text{кок}} - 3\tau_{\text{вийм}} + 0,15t_{\text{розл}} + 0,25t_{\text{кок}}, R=0,75 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм};$$

де $h_{\text{кок}}$ – товщина кокілю, мм; $\tau_{\text{вийм}}$ – час охолодження виливка, год;
 $t_{\text{розл}}$ – температура розливання, °С; $t_{\text{кок}}$ – вихідна температура кокілю, °С.

Таблиця 3 –Результати розрахунку НДС

Номер позиції*															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1060	100	1380	140	36	12,8	-109	74,4	154	399,6	3983	154	295,2	5	100
2	1060	100	1380	140	54	12,8	-133	66,4	77	033,6	3160	74	352,4	3	40
3	1060	100	1430	140	72	10,4	-146	75,2	153	031,6	2311	130	327,2	3	40
4	1060	100	1380	100	72	12,8	-092	74,0	140	400,0	2446	121	334,0	7	40
5	1060	100	1420	140	72	12,8	-146	74,4	116	035,2	0331	50	368,0	7	0
6	1060	100	1380	180	72	12,8	-109	74,4	121	399,6	2487	99	342,0	9	40
7	1060	100	1430	140	72	14,8	-79	73,2	153	031,6	2400	140	323,6	7	40
8	1060	100	1430	180	72	14,8	-146	75,2	111	037,2	2324	52	366,8	3	0
9	1060	100	1380	140	91	12,8	-133	66,4	94	033,6	2657	77	354,8	5	100
10	1060	100	1380	140	110	12,8	-118	112,0	154	399,6	2635	13	392,8	5	100
11	1060	200	1380	140	36	14,4	-132	80,0	192	356,8	4196	189	252,0	3	120
12	1060	200	1380	140	54	14,4	-150	112,0	88	400,0	3856	88	333,6	5	120
13	1060	200	1320	140	72	11,6	-102	77,6	153	056,8	2410	110	339,2	3	80
14	1060	200	1380	100	72	14,4	-134	80,0	84	400,0	2516	71	357,6	3	80
15	1060	200	1380	140	72	14,4	-146	74,4	152	042,4	1272	130	331,2	1	40

Продовження таблиці 3

16	1060	200	1380	180	72	14,4	-134	80,0	87	045,2	2513	74	356,4	3	80
17	1060	200	1430	140	72	16,4	-123	81,2	110	399,6	2462	84	350,4	5	80
18	1060	200	1380	140	91	14,4	-143	92,8	88	400,0	2519	40	374,8	5	120
19	1060	200	1380	140	110	14,4	-150	112,0	192	356,8	2552	-02	397,6	4	0
20	1060	300	1380	140	72	15,6	-84	80,0	153	056,8	1957	139	327,6	1	60
21	800	100	1380	140	48	8,4	-12	48,8	194	399,6	2376	194	237,6	1	40
22	800	150	1380	140	24	8,8	-95	50,4	181	391,6	3371	181	226,4	1	80
23	800	150	1380	140	36	8,8	-103	44,0	82	397,6	2549	82	300,4	1	120
24	800	150	1420	100	48	6,8	-82	45,2	174	398,8	2177	174	247,2	1	80
25	800	150	1410	140	48	6,8	-92	55,2	122	040,8	2066	112	281,6	1	80
26	800	150	1380	100	48	8,8	-98	51,6	91	398,0	2088	91	296,4	1	100
27	800	150	1380	180	48	8,8	-95	50,4	91	398,4	2089	91	296,0	1	100
28	800	150	1430	140	48	10,0	-98	51,6	112	398,0	2073	89	299,2	1	80
29	800	150	1430	180	48	10,0	-83	51,6	174	398,8	2102	108	284,4	1	80
30	800	150	1410	140	60	8,8	-103	44,0	84	027,6	1948	74	312,8	1	40
31	800	150	1380	140	72	8,8	-99	73,6	181	391,6	1995	30	361,6	1	120
32	800	200	1380	140	24	9,2	-90	53,6	222	225,6	3239	214	200,4	3	60
33	800	200	1380	140	36	9,2	-86	73,2	133	397,6	3293	133	260,0	1	60
34	800	200	1320	140	48	7,2	-96	52,8	156	046,8	1954	89	299,6	1	100
35	800	200	1380	100	48	9,2	-89	53,6	116	036,0	1948	99	291,2	1	80
36	800	200	1380	140	48	9,2	-83	53,6	194	399,6	2057	107	288,0	1	80
37	800	200	1380	180	48	9,2	-90	53,6	107	034,4	2002	99	292,0	1	100
38	800	200	1430	140	48	10,8	-96	52,8	116	036,0	2015	113	282,4	1	80
39	800	200	1410	140	60	9,2	-135	60,4	133	397,6	1810	32	357,2	5	60
40	800	200	1380	140	72	9,2	-86	73,2	222	225,6	1826	60	330,0	3	60
41	800	250	1380	140	48	9,2	-92	55,2	122	040,8	1886	96	297,6	1	80
42	800	300	1380	140	48	9,6	-83	53,6	156	046,8	2675	122	278,0	1	100

**Примітка:* 1-й стовпець (далі тільки номер) – номер варіанта; 2-й – діаметр ($D_{\text{відл}}$), мм; 3-й – товщина кокіля ($h_{\text{кок}}$), мм; 4-й – температура розливання металу ($t_{\text{розл}}$), °С; 5-й стовпець – вихідна температура кокіля ($t_{\text{кок}}$), °С; 6-й - час виїмки виливка з кокілю ($\tau_{\text{вийм}}$), год; 7-й – час кристалізації ($\tau_{\text{крисл}}$), год; 8-й - максимальне стискаюче напруження ($\sigma_{\text{макс.ст.}}$), МПа; 9-й - час, год відносно 8-го стовпця; 10-й - максимальне розтягуюче напруження ($\sigma_{\text{ост.раст.}}$), МПа; 11-й - час, год відносно 10-го стовпця; 12-й - напружений стан ($\sigma_{\text{макс.напр.}}$) на 400-й год (сума абсолютних величин напружень у всіх розрахункових точках поділу виливка), МПа; 13-й - розтягуюче напруження на 400-й год, МПа; 14-й - час, при якому деформація на зовнішньому шарі відрізняється від деформації на 400-й год (кінець розрахунку) $\leq 5\%$; 15-й - кількість змін знаку впродовж радіусу ($N_{\text{зм}}$); 16-й – товщина ($h_{\text{розт}}$) розтягнутого зовнішнього шару (входять розрахункові точки поділу радіусу, деформація розтягування у яких перевищує величину гранично пружної деформації), мм.

Для валків з $\varnothing 800$ мм параметр товщини кокілю виявився не значущим, а з $\varnothing 1600$ мм - малозначущим на рівень залишкових напружень, що виникають при кристалізації по перерізу виливка. Найбільший вплив на величину залишкового напруження мають час охолодження виливка, вихідна температура кокілю.

Температура розливання металу є значущим параметром для валків $\varnothing 1060$ мм і малозначущим для валків з меншим діаметром – 800 мм. Максимальні стискаючи напруження зовнішнього шару ($\sigma_{\text{макс.ст.}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{макс.ст.}} = 402,1 - 0,02h_{\text{кок}} + 0,05\tau_{\text{выем}} - 0,21t_{\text{разл}} + 0,13t_{\text{кок}}, R=0,29 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$\sigma_{\text{макс.ст.}} = -28,2 - 0,08h_{\text{кок}} + 0,18\tau_{\text{выем}} + 0,1t_{\text{разл}} - 0,04t_{\text{кок}}, R=0,28 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм}.$$

Вплив досліджених параметрів на $\sigma_{\text{макс.ст.}}$ залежить лише на 28-29% від дисперсійного розкиду властивостей. Можна припустити, що іншими факторами є напруження II роду та фазові перетворення, у тому числі формування залишкового аустеніту (його частки). Максимальні показники напруженого стану ($\sigma_{\text{макс.напр.}}$), МПа оцінювали за залежностями:

$$\sigma_{\text{макс.напр.}} = -1598,2 - 1,2h_{\text{кок}} - 27,1\tau_{\text{вийм}} + 4,4t_{\text{розл}} + 0,79t_{\text{кок}}, R=0,51 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$\sigma_{\text{макс.напр.}} = -1656 + 2,7h_{\text{кок}} - 32,6\tau_{\text{вийм}} + 3,2t_{\text{розл}} + 2,9t_{\text{кок}}, R=0,63 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм}.$$

Оцінка напруженого стану показала коефіцієнт кореляції значно нижчий 1.0, тому додатково розглянули низку чинників, що можуть впливати на знак і рівень напружень.

Число змін знаку вдовж радіуса ($N_{\text{зм}}$), разів:

$$N_{\text{зм}} = -21,42 - 0,0062h_{\text{кок}} + 0,024\tau_{\text{вийм}} + 0,018t_{\text{розл}}, R=0,40 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$N_{\text{зм}} = 23,05 + 0,0002h_{\text{кок}} + 0,017\tau_{\text{вийм}} - 0,014t_{\text{розл}} - 0,019t_{\text{кок}}, R=0,44 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм}.$$

Товщина розтягнутого шару ($h_{\text{розт}}$), мм:

$$h_{\text{розт}} = -15,29 + 0,02h_{\text{кок}} - 0,64\tau_{\text{вийм}} + 0,09t_{\text{розл}}, R=0,34 \text{ для } D_{\text{відл}}=1600\text{мм};$$

$$h_{\text{розт}} = 56,62 + 0,13h_{\text{кок}} - 0,023\tau_{\text{вийм}} - 0,023t_{\text{розл}} + 0,18t_{\text{кок}}, R=0,27 \text{ для } D_{\text{відл}}=800\text{мм}.$$

Таблиця 4 - Результати розрахунку залишкових напружень (I роду)

r_i , мм ($\Delta r=19,61$)	Залишкові напруження σ_{oi} , МПа в момент часу τ , при $\Delta\tau=0,4\text{с}$					
	$\varnothing 1060\text{мм}$, варіант розрахунку №15				$\varnothing 800\text{мм}$, варіант розрахунку №38	
	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_1	τ_2
1	2	3	4	5	6	7
19,61	23,00	22,60	11,30	11,00	21,8	-35,7
39,22	23,10	22,70	11,40	11,10	21,9	-37,2
58,83	23,70	23,30	12,00	11,70	23,1	-6,2
78,44	6,10	-1,30	4,40	-3,00	-1,5	-73,9
98,05	-41,40	-35,30	-41,80	-35,10	-35,9	-84,3
117,66	-67,10	-72,30	-65,20	-62,90	-74,3	-119,8

Продовження таблиці 4

137,27	-92,20	-91,90	-89,10	-91,10	-86,5	-170,7
156,88	-107,70	-111,30	-106,00	-104,10	-100,9	-156
176,49	-122,10	-117,90	-122,30	-119,70	-113	-120,3
196,10	-134,40	-136,00	-130,30	-131,60	-108,5	-101,2
215,71	-133,00	-131,00	-130,80	-130,50	-76,3	-111,1
235,32	-128,20	-121,30	-122,10	-126,00	-66,5	-97,8
254,93	-100,80	-97,30	-98,30	-100,70	-48,8	-83,5
274,54	-84,00	-85,70	-82,60	-82,50	-37,8	-83,4
294,15	-72,50	-75,80	-66,90	-70,20	-14,4	-1,4
313,76	-59,30	-55,50	-66,10	-58,50	-1,8	182,5
333,37	-42,70	-47,00	-46,60	-46,40	15,3	-75,4
352,98	-33,50	-34,80	-39,80	-31,10	42,2	61,9
372,59	-22,10	-18,20	-24,00	-23,30	65,4	87,8
392,20	-6,70	-8,40	-7,90	-9,00	87,3	111,7
411,81	12,00	6,00	12,00	10,30	119,3	140,1
431,42	28,40	27,90	26,70	29,70		
451,03	49,40	49,40	48,20	47,30		
470,64	67,50	69,00	70,60	67,20		
490,25	91,10	92,70	92,10	92,70		
509,86	115,30	116,10	116,00	113,20		
529,46	143,30	143,10	143,70	143,90		

Для визначення впливу швидкості кристалізації металу на однорідність його структури у робочому шарі провели теоретичні дослідження щодо зміни швидкості кристалізації шляхом математичної оцінки впливу на неї різних параметрів (табл. 5). В результаті було отримано лінійне рівняння:

$$\text{Час кристалізації } (\tau_{\text{крис.}}): \tau_{\text{крис.}} = -50,297 + 0,019D_{\text{відл}} + 0,0068h_{\text{н}} + 0,0071h_{\text{кок}} - 0,007\tau_{\text{вийм}} + 0,0031t_{\text{розл}} + 0,00074t_{\text{кок}}, R=0,99$$

Таблиця 5 - Тривалість охолодження виливки з моменту заливки

Характеристика завдання і значення параметра, що варіюється	Діаметр валка, мм та тривалість охолодження виливка з моменту заливки, год.	
	800	1060
Вплив товщини кокілю ($h_{\text{кок}}$)		
Товщина кокіля: 100 мм	48,5	14
150 мм	-	-
200 мм	12,5	10

Продовження таблиці 5

250 мм	-	7,5
300 мм	7,5	25
Вплив товщини намазки (h_n)		
Товщина намазки: 4 мм	-	15,0
5 мм	-	10
6 мм	-	12,2
10 мм	-	13
15 мм	-	14
20 мм	-	14,5
Вплив вихідної температури форми		
100°C	-	10,0
120°C	-	12,0
150°C	-	13,0
180°C	-	14
Вплив температури заливки		
1380°C	-	12,5
1400°C	-	4
1420°C	-	13
1430°C	-	14

З отриманих залежностей випливає, що кристалізація в цілому при використанні кокілю товщиною 300 мм йде повільніше, хоча в приграничних областях у вихідний період прискорюється кристалізація. Швидкість кристалізації визначає спрямованість зростання кристалів і частку, і навіть розмір зерен карбідної фази. Встановлено, що найбільший вплив мають товщина кокіля ($h_{\text{кок}} = 100-300\text{мм}$), товщина намазки покриття ($h_n = 4-20\text{мм}$) та час охолодження виливка (досліджений інтервал $\tau_{\text{вийм}} = 24-110$ год). Значення, за яких швидкість кристалізації виливка максимальна: для валків $\varnothing 800\text{мм}$ ($\tau_{\text{крист.}} = 6,8$ год) - $t_{\text{розл}} = 1410^\circ\text{C}$; $h_{\text{кок}} = 150\text{мм}$; $h_n = 6,2\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}} = 48$ год; $\varnothing 1060\text{мм}$ ($\tau_{\text{крист.}} = 10,4$ год) - $t_{\text{розл}} = 1430^\circ\text{C}$; $h_{\text{кок}} = 100\text{мм}$; $h_n = 4,5\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}} = 72$ год. Тобто зміною товщини кокілю та шару теплоізоляційного покриття (намазки) форми, а також часом охолодження виливка можна суттєво регулювати швидкість кристалізації. З проведеного аналізу видно, що температура кокілю перед розливом металу (інтервал нагріву $t_{\text{кок}} = 100-180^\circ\text{C}$), практично не впливає на умови кристалізації валків.

На рис. 4 наведено залежності зміни температури від часу кристалізації на перерізі валка $\varnothing 1060$ мм та кокіля. Довжина вдовж горизонталі відповідає радіусу валка (до вертикальної лінії, а після неї – товщині кокіля).

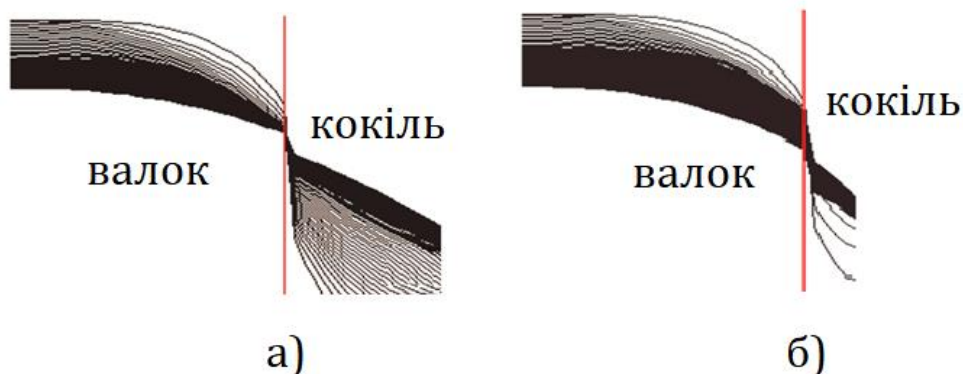


Рисунок 4 - Залежність зміни температури від часу кристалізації по перерізу валка $\varnothing 1060$ мм та кокілю товщиною: а) 300 мм; б) 100 мм

Графіки побудовано за точками через 0,025 год. тому лінії зливаються, утворюючи чорні ділянки. Вертикальна лінія на графіках характеризує межу валок-кокіль і відрізняється стрибком температур з-поміж них, тобто у цьому місці стику видно розрив у температурах між ними за рівності теплових потоків. Без урахування стику температура поверхні кокілю підвищується на 10-20%. З наведених даних випливає, що кристалізація загалом для кокілю товщиною 300 мм йде повільніше, хоча у приграничних областях у вихідний період прискорюється кристалізація. Для прогнозування впливу досліджуваних параметрів при кристалізації на НДС прокатних валків різного діаметра було проведено теоретичний аналіз з урахуванням діаметра. В результаті аналізу були отримані лінійні рівняння.

Максимальне напруження розтягування зовнішнього шару ($\sigma_{\text{ост.розт.макс}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{ост.розт.макс}} = 13,1 + 0,13D_{\text{відл}} + 0,31h_{\text{кок}} - 2,1\tau_{\text{вийм}} + 0,02t_{\text{розл}} + 0,1t_{\text{кок}}, R=0,86,$$

де $D_{\text{відл}}$ – діаметр вилівка, мм.

Тривалість дії max напруження розтягнення зовнішнього шару ($\tau_{\text{макс.розт.}}$), год:

$$\tau_{\text{макс.розт.}} = -79,66 - 0,060D_{\text{відл}} + 0,419h_{\text{кок}} - 4,53\tau_{\text{вийм}} + 0,301t_{\text{розл}} + 0,77t_{\text{кок}}, R=0,77$$

Максимальне стискаюче напруження зовнішнього шару ($\sigma_{\text{макс.ст.}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{макс.ст.}} = 85,7 + 0,12D_{\text{відл}} - 0,32h_{\text{кок}} + 1,1\tau_{\text{вийм}} - 0,04t_{\text{розл}} + 0,07t_{\text{кок}}, R=0,72$$

Тривалість дії тах стискаючого напруження зовнішнього шару ($\tau_{\text{макс.ст.}}$), год:

$$\tau_{\text{макс.ст.}} = -14,51 + 0,043D_{\text{відл}} + 0,026h_{\text{кок}} + 0,675\tau_{\text{вийм}} - 0,003t_{\text{розл}} + 0,013t_{\text{кок}}, R=0,99$$

Максимальний показник напруженого стану ($\sigma_{\text{макс.напр.}}$), МПа:

$$\sigma_{\text{макс.напр.}} = -2511,4 + 3,5D_{\text{відл}} - 0,6h_{\text{кок}} - 29,1\tau_{\text{вийм}} - 0,24t_{\text{розл}} + 0,9t_{\text{кок}}, R=0,56$$

Число змін знаку вдовж радіусу ($N_{\text{зм}}$), разів:

$$N_{\text{зм}} = 20,77 - 0,006D_{\text{відл}} - 0,014h_{\text{кок}} + 0,099\tau_{\text{вийм}} - 0,010t_{\text{розл}} + 0,004t_{\text{кок}}, R=0,71$$

Товщина розтягнутого шару ($h_{\text{розт}}$), мм:

$$h_{\text{розт}} = -9,953 + 0,013D_{\text{відл}} + 0,0462h_{\text{кок}} - 0,363\tau_{\text{вийм}} + 0,021t_{\text{розл}} - 0,029t_{\text{кок}}, R=0,48$$

Показник напруженого стану має корелювати із твердістю валка. При цьому чим товщим є кокіль, тим більше напруження. Час вилучення виливка з кокілю, а також температура перегріву металу та розливу сильно впливають на його напружений стан і ці фактори сумарно підвищують рівень НДС ~ на 33%.

На рис. 5 наведено залежності зміни температури від часу кристалізації для валків Ø1060, відлитих у кокіль товщиною 100 та 300 мм. Аналізували зміни температури від часу (у період до 40 год) у чотирьох точках. Горизонтальні лінії на графіках відповідають: верхня температура ліквідусу, нижня – температура солідуса.

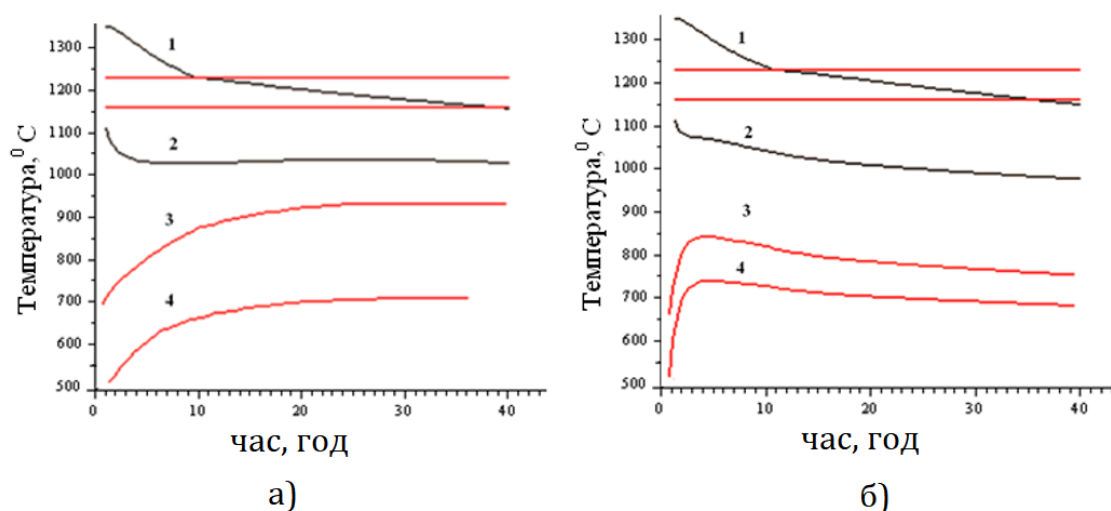


Рисунок 5 - Залежність температури від часу кристалізації валка Ø1060 мм у кокілі завтовшки: а – 300 мм; б – 100 мм. Зміни температури від часу: 1 - в центрі виливка; 2 – в відливці на стику з кокілем; 3 – в кокілі на стику з виливком; 4 – кокілю на зовнішній стороні

Виконані розрахунки показали, що при охолодженні зовнішні шари, що мають нижчу температуру, швидше зазнають розтягуючих напружень. Так, для виливків Ø800 мм max розтягуючі напруження виникають на 3/4 радіусу, а для валків Ø1060 мм - на поверхні. При цьому зі збільшенням діаметра вилівка показник НДС зі збільшенням часу знижується (відбувається відпал). Схеми формування напружень через нерівномірність температурних полів по перерізу валка для досліджених варіантів (див. табл. 3) наведена на рис.6. По осі абсцис відкладено тривалість процесу, год; ординат – температура, °С. На графіки температур накладено графік зеленого кольору – сформоване напруження у зовнішньому шарі з позначенням залишкового напруження. Для всіх графіків інтервал зміни напружень знаходиться в межах від -240...+240 МПа. Горизонтальна зелена лінія - нульове напруження.

На всіх графіках межі кокіль-вилівок чітко видно майданчик, що відповідає фазовим перетворенням. Для зовнішнього шару цей майданчик теж видно, але нахил його більший, ніж в центрі. Дві горизонтальні червоні лінії, відповідають температурі солідуса та ліквідуса. Значення температур наведені у табл.6 та 7.

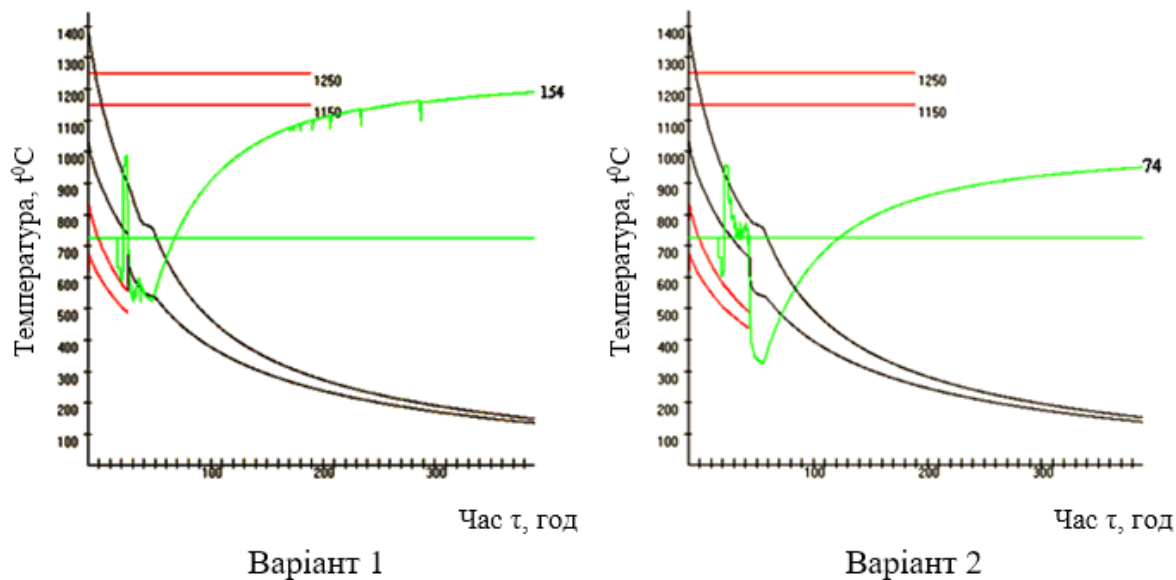
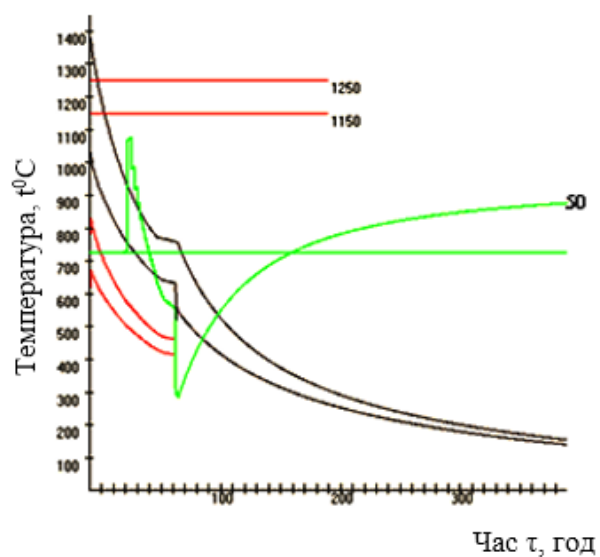
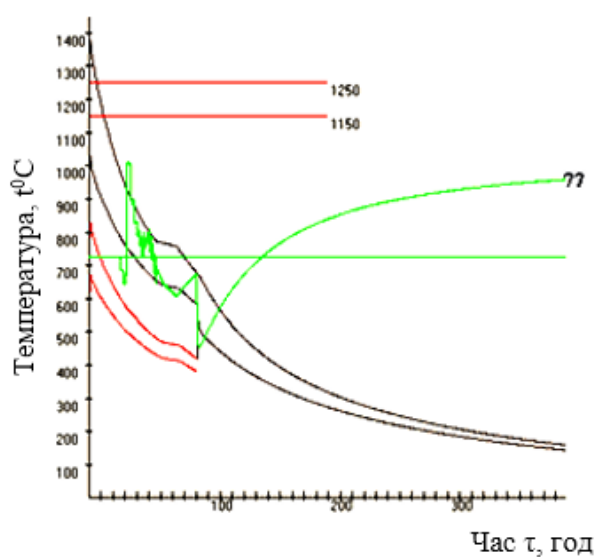


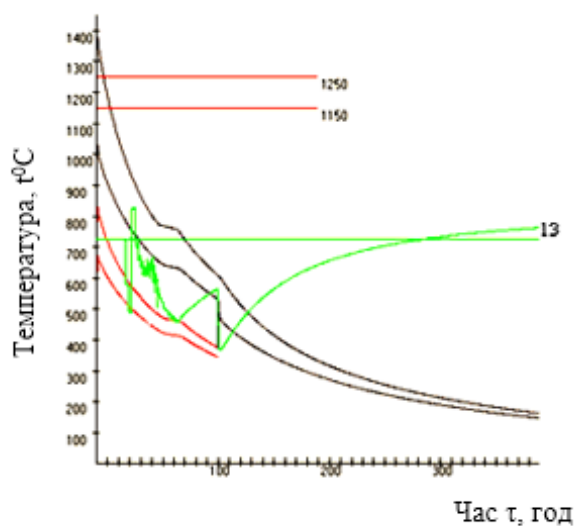
Рисунок 6 - Розрахункові залежності для досліджених варіантів кристалізації виливків відповідно даних табл.3



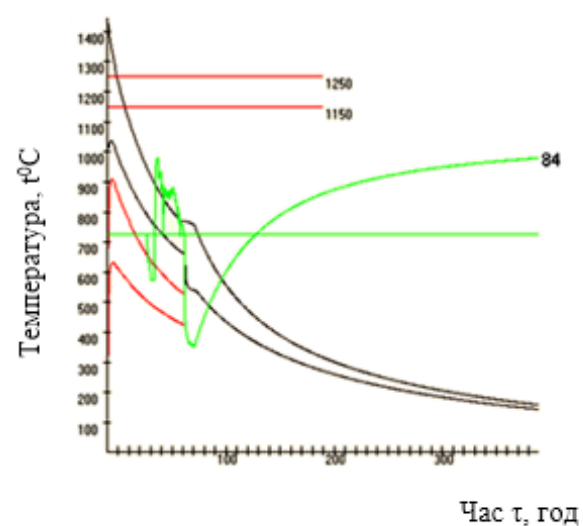
Варіант 5



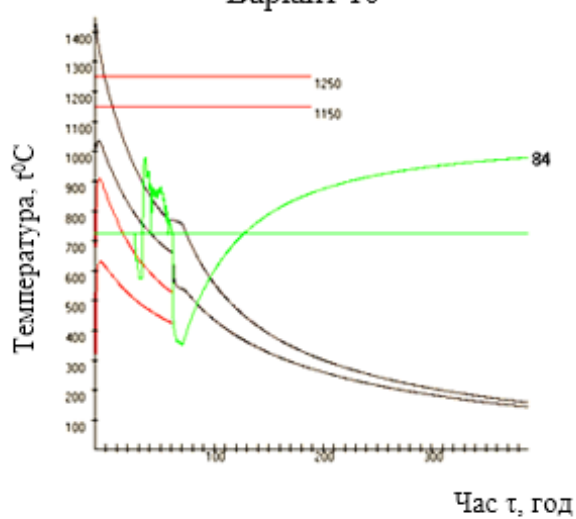
Варіант 9



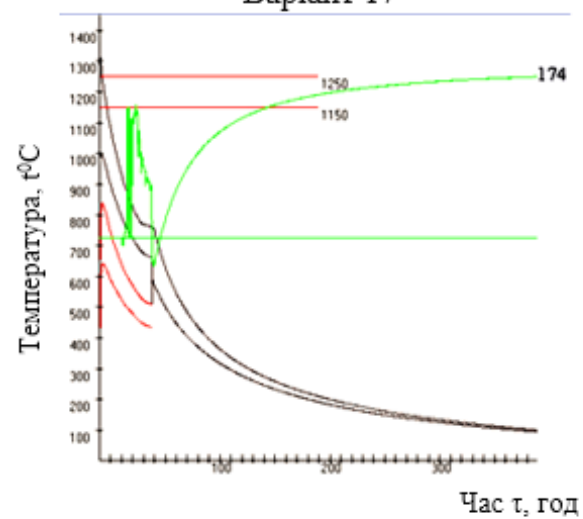
Варіант 10



Варіант 17

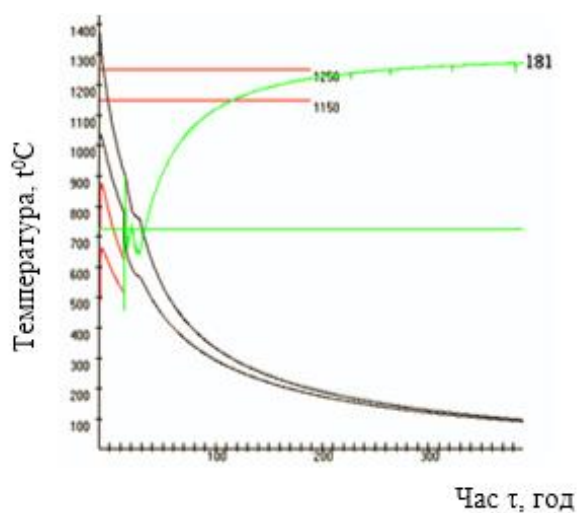


Варіант 20

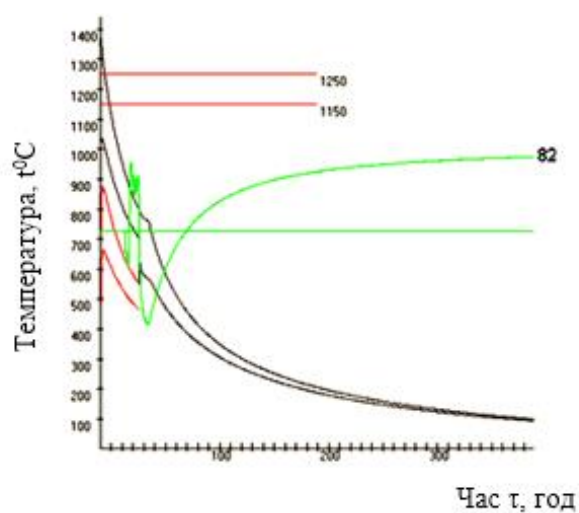


Варіант 21

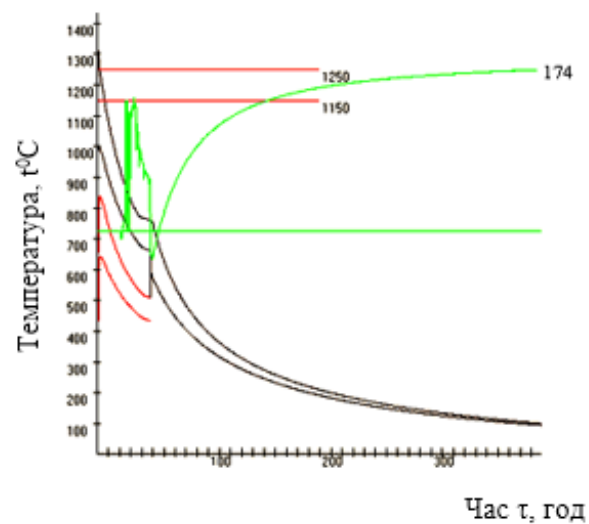
Продовження рис. 6



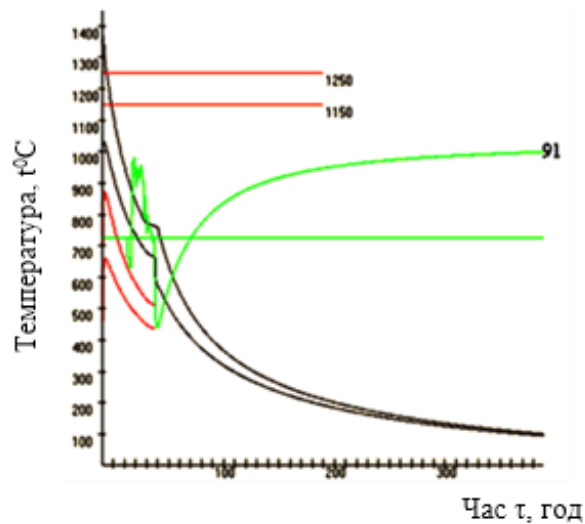
Варіант 22



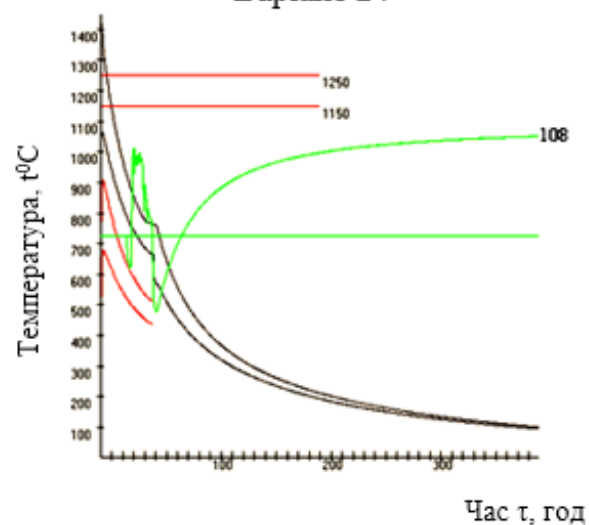
Варіант 23



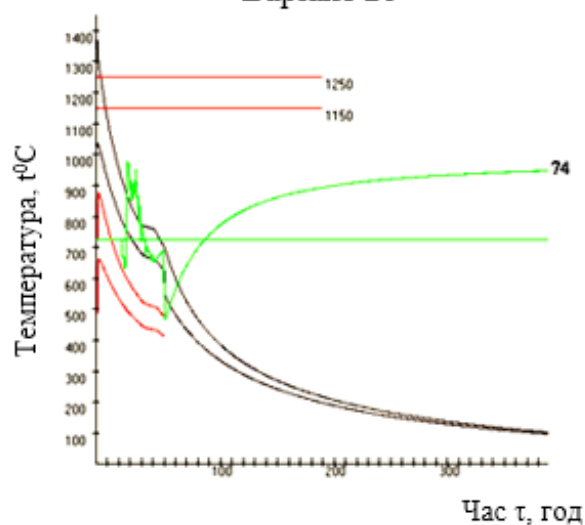
Варіант 24



Варіант 26

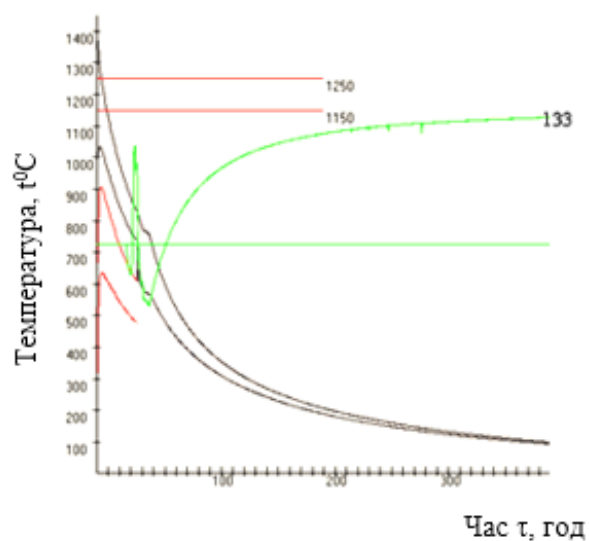


Варіант 29

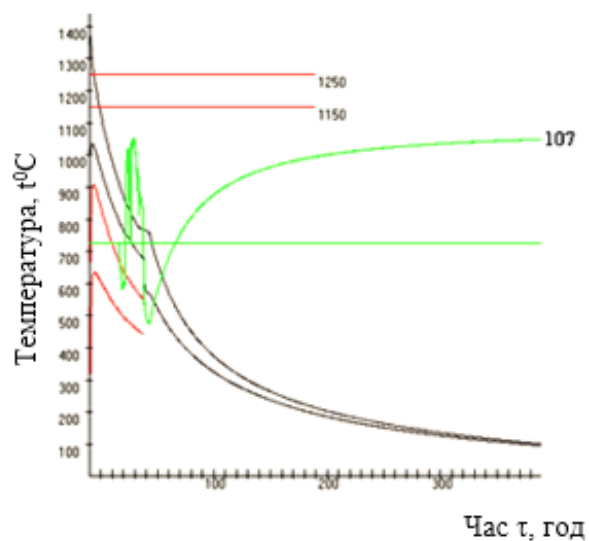


Варіант 30

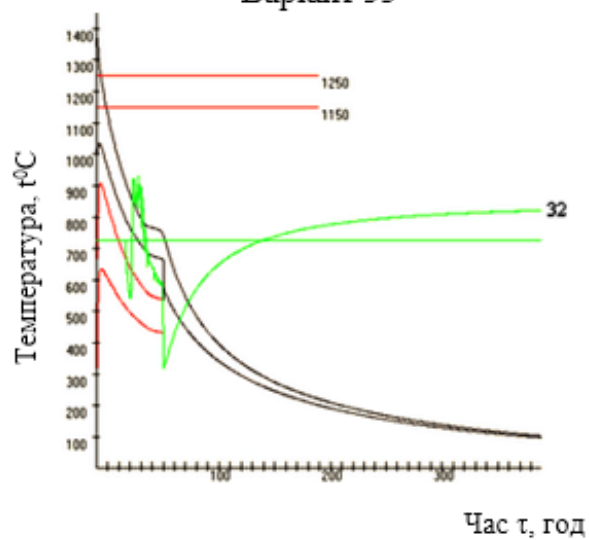
Продовження рис. 6



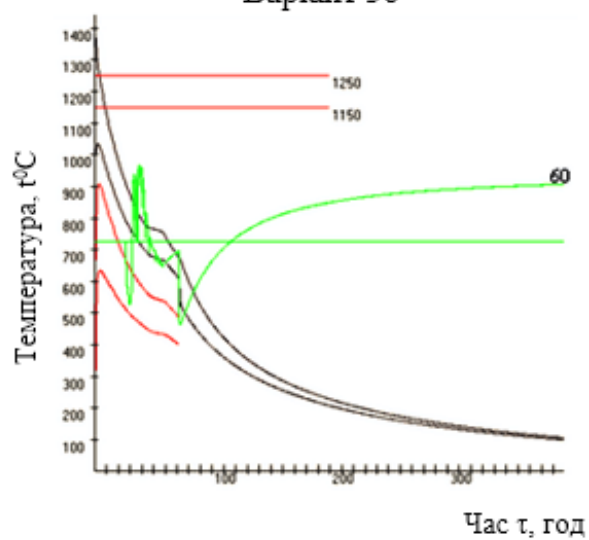
Варіант 33



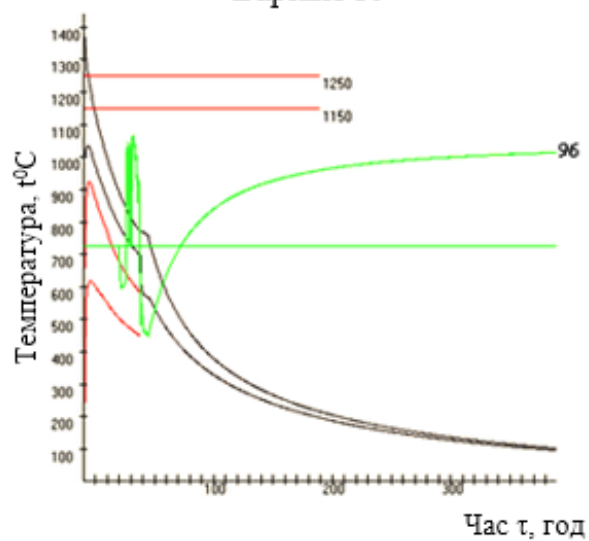
Варіант 36



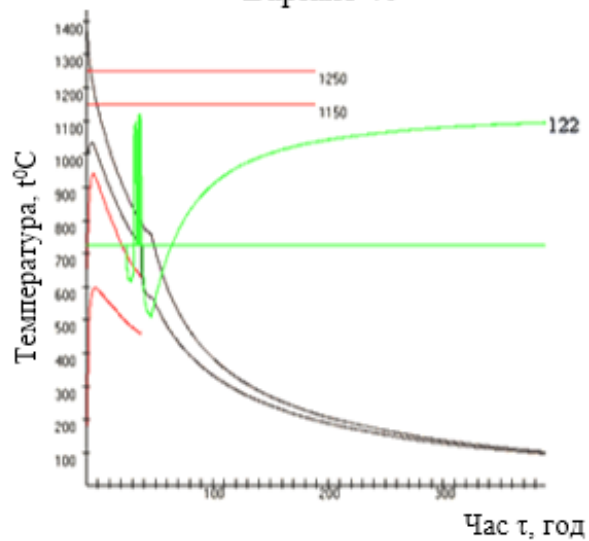
Варіант 39



Варіант 40



Варіант 41



Варіант 42

Продовження рис. 6

Таблиця 6 – Вимірювання температури по перерізу валка, °C

Час, год	Відстань від центра до поверхні валка, мм								
	19,6	39,2	58,8	78,4	98	117,6	137,2	156,8	176,4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	1193,7	1193,6	1193,2	1192,3	1190,8	1188,7	1185,8	1182,3	1178,0
16	1095,6	1095,5	1095,2	1094,4	1093,2	1091,4	1089,0	1086,0	1082,3
24	1014,2	1014,2	1013,9	1013,2	1012,1	1010,5	1008,4	1005,8	1002,6
32	945,7	945,7	945,4	944,8	943,8	942,4	940,6	938,3	935,5
40	887,2	887,2	887,0	886,5	885,6	884,4	882,8	880,8	878,3
48	838,7	838,6	838,5	838,0	837,3	836,3	834,9	833,2	831,1
56	798,4	798,4	798,2	797,9	797,3	796,4	795,3	793,9	792,2
64	770,3	770,3	770,3	770,1	770,0	769,6	769,0	768,1	766,8
72	765,4	765,4	765,2	764,7	763,9	762,8	761,3	759,3	757,0
80	758,8	758,8	758,5	758,0	757,0	755,6	753,9	751,9	749,5
88	730,3	730,3	730,2	729,8	729,2	728,3	727,2	725,8	724,0
96	685,0	684,9	684,7	684,0	682,9	681,4	679,3	676,7	673,6
104	629,0	629,0	628,7	628,2	627,2	625,9	624,1	621,8	619,1
112	582,1	582,1	581,9	581,4	580,6	579,4	577,8	575,9	573,5
120	542,2	542,2	542,0	541,6	540,8	539,8	538,4	536,7	534,6
128	507,8	507,8	507,6	507,2	506,6	505,6	504,4	502,9	501,0
136	477,7	477,7	477,6	477,2	476,6	475,8	474,7	473,4	471,7
144	451,2	451,2	451,1	450,8	450,2	449,5	448,5	447,3	445,8
152	427,7	427,6	427,5	427,2	426,8	426,1	425,2	424,1	422,7
160	406,5	406,5	406,4	406,1	405,7	405,1	404,3	403,3	402,0
168	387,5	387,5	387,4	387,1	386,7	386,2	385,4	384,5	383,3
176	370,2	370,1	370,0	369,8	369,5	368,9	368,2	367,4	366,3
184	354,4	354,3	354,3	354,1	353,7	353,2	352,6	351,8	350,8
192	339,9	339,9	339,8	339,6	339,3	338,8	338,2	337,5	336,6
200	326,5	326,5	326,4	326,3	326,0	325,5	325,0	324,3	323,4
208	314,2	314,2	314,1	313,9	313,7	313,3	312,7	312,1	311,3
216	302,7	302,7	302,6	302,5	302,2	301,9	301,4	300,8	300,0
224	292,1	292,0	292,0	291,8	291,6	291,2	290,8	290,2	289,5
232	282,1	282,1	282,0	281,9	281,7	281,3	280,9	280,4	279,7
240	272,8	272,8	272,7	272,6	272,4	272,1	271,6	271,1	270,5
248	264,0	264,0	264,0	263,8	263,6	263,3	263,0	262,5	261,9
256	255,8	255,8	255,7	255,6	255,4	255,1	254,8	254,3	253,8

Продовження табл.6

Час, год	Відстань від центра до поверхні валка, мм								
	196	215,6	235,2	254,8	274,4	294	313,6	333,2	352,8
1	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8	1172,9	1167,0	1160,3	1152,8	1144,4	1135,1	1125,0	1114,1	1102,2
16	1078,0	1073,0	1067,4	1061,0	1053,9	1046,1	1037,5	1028,2	1018,1
24	998,8	994,5	989,5	983,9	977,7	970,8	963,3	955,2	946,3
32	932,2	928,3	924,0	919,1	913,6	907,6	901,0	893,8	886,1
40	875,4	872,1	868,3	864,0	859,3	854,0	848,3	842,1	835,3
48	828,6	825,8	822,5	818,9	814,8	810,3	805,5	800,2	794,4
56	790,1	787,8	785,1	782,1	778,8	775,1	771,1	766,8	761,6
64	765,1	762,9	760,1	756,8	752,8	748,4	743,6	738,5	733,0
72	754,2	751,1	747,7	743,9	739,7	735,2	730,4	725,2	719,6
80	746,8	743,8	740,4	736,6	732,5	728,1	723,4	718,2	712,8
88	722,0	719,6	716,9	713,9	710,5	706,8	702,8	698,3	693,6
96	669,9	665,6	660,7	655,2	649,1	642,4	635,0	627,0	618,3
104	615,9	612,2	608,0	603,2	597,9	592,1	585,7	578,8	571,3
112	570,7	567,5	563,8	559,7	555,1	550,0	544,4	538,4	531,9
120	532,2	529,3	526,1	522,4	518,4	513,9	509,0	503,7	498,0
128	498,9	496,3	493,5	490,2	486,6	482,7	478,3	473,6	468,5
136	469,7	467,5	464,9	462,0	458,8	455,2	451,3	447,1	442,5
144	444,0	442,0	439,6	437,0	434,1	430,9	427,4	423,6	419,4
152	421,1	419,3	417,1	414,8	412,1	409,2	406,0	402,5	398,8
160	400,5	398,9	396,9	394,7	392,3	389,7	386,7	383,6	380,1
168	382,0	380,4	378,6	376,6	374,4	372,0	369,3	366,4	363,2
176	365,1	363,6	362,0	360,2	358,1	355,9	353,4	350,7	347,8
184	349,7	348,3	346,8	345,1	343,2	341,1	338,8	336,3	333,6
192	335,5	334,3	332,9	331,3	329,5	327,6	325,4	323,1	320,6
200	322,4	321,3	320,0	318,5	316,9	315,0	313,1	310,9	308,6
208	310,4	309,3	308,1	306,7	305,1	303,4	301,6	299,6	297,4
216	299,1	298,1	297,0	295,7	294,2	292,6	290,9	289,0	287,0
224	288,7	287,7	286,7	285,4	284,1	282,6	280,9	279,2	277,2
232	278,9	278,0	277,0	275,9	274,6	273,2	271,6	269,9	268,1
240	269,8	268,9	268,0	266,9	265,7	264,3	262,9	261,3	259,6
248	261,2	260,4	259,5	258,4	257,3	256,0	254,6	253,1	251,5
256	253,1	252,3	251,5	250,5	249,4	248,2	246,9	245,5	243,9
264	245,5	244,7	243,9	243,0	242,0	240,8	239,6	238,2	236,8

Продовження табл.6

Час, год	Відстань від центра до поверхні валка, мм								
	372,4	392	411,6	431,2	450,8	470,4	490	509,6	530
1	20	21	22	23	24	25	26	27	28
8	1089,5	1075,8	1061,3	1045,8	1029,5	1012,2	994,1	975,0	955,0
16	1007,3	995,6	983,2	970,0	956,0	941,2	925,7	909,3	892,1
24	936,8	926,7	915,8	904,3	892,1	879,2	865,6	851,3	836,3
32	877,7	868,8	859,3	849,1	838,4	827,1	815,1	802,6	789,4
40	828,1	820,4	812,1	803,3	794,1	784,3	773,9	763,1	751,3
48	788,3	781,7	774,7	767,2	758,8	749,6	739,8	729,6	718,9
56	755,4	748,8	741,7	734,2	726,2	717,7	708,8	699,5	689,8
64	727,1	720,8	714,2	707,1	699,7	691,8	683,6	674,9	665,9
72	713,7	707,5	700,8	693,9	686,5	678,9	670,8	662,4	653,6
80	707,0	700,8	694,3	687,4	680,2	672,7	664,8	656,5	647,9
88	688,4	682,9	677,1	670,8	664,2	657,2	649,9	642,2	634,1
96	609,0	599,0	588,3	577,0	565,0	552,3	538,9	524,8	510,1
104	563,3	554,6	545,5	535,7	525,4	514,5	503,0	490,9	478,3
112	524,9	517,4	509,4	500,9	491,9	482,4	472,4	461,9	450,9
120	491,8	485,2	478,2	470,7	462,8	454,4	445,6	436,3	426,6
128	463,0	457,1	450,9	444,2	437,2	429,7	421,9	413,6	405,0
136	437,6	432,3	426,7	420,7	414,4	407,7	400,7	393,3	385,6
144	415,0	410,2	405,2	399,8	394,1	388,0	381,7	375,0	368,0
152	394,7	390,4	385,8	380,9	375,7	370,2	364,5	358,4	352,0
160	376,5	372,5	368,3	363,8	359,1	354,1	348,8	343,2	337,4
168	359,8	356,2	352,3	348,2	343,9	339,3	334,4	329,3	324,0
176	344,7	341,3	337,8	334,0	329,9	325,7	321,2	316,5	311,6
184	330,8	327,7	324,3	320,8	317,1	313,2	309,0	304,6	300,1
192	317,9	315,0	312,0	308,7	305,2	301,6	297,7	293,6	289,4
200	306,1	303,4	300,5	297,4	294,2	290,8	287,2	283,4	279,4
208	295,0	292,5	289,8	287,0	283,9	280,7	277,4	273,8	270,1
216	284,8	282,4	279,9	277,2	274,4	271,3	268,2	264,9	261,4
224	275,2	272,9	270,6	268,0	265,4	262,5	259,6	256,4	253,2
232	266,2	264,1	261,8	259,5	256,9	254,3	251,5	248,5	245,4
240	257,7	255,7	253,6	251,4	249,0	246,5	243,8	241,0	238,1
248	249,8	247,9	245,9	243,8	241,5	239,1	236,6	234,0	231,2
256	242,3	240,5	238,6	236,6	234,4	232,2	229,8	227,3	224,7
264	235,2	233,5	231,7	229,8	227,7	225,6	223,3	220,9	218,4

Продовження табл.6

1	20	21	22	23	24	25	26	27	28
272	228,5	226,8	225,1	223,3	221,4	219,3	217,2	214,9	212,5
280	222,1	220,5	218,9	217,2	215,3	213,4	211,3	209,2	206,9
288	216,0	214,6	213,0	211,3	209,6	207,7	205,8	203,7	201,5
296	210,3	208,9	207,4	205,8	204,1	202,3	200,4	198,5	196,4
304	204,8	203,4	202,0	200,5	198,9	197,2	195,4	193,5	191,5
312	199,5	198,2	196,9	195,4	193,9	192,2	190,5	188,7	186,8
320	194,5	193,3	192,0	190,6	189,1	187,5	185,9	184,1	182,3
328	189,7	188,5	187,3	185,9	184,5	183,0	181,4	179,7	178,0
336	185,1	184,0	182,8	181,5	180,1	178,7	177,1	175,5	173,9
344	180,7	179,6	178,4	177,2	175,9	174,5	173,0	171,5	169,9
352	176,5	175,4	174,3	173,1	171,8	170,5	169,1	167,6	166,0
360	172,4	171,4	170,3	169,2	167,9	166,7	165,3	163,9	162,4
368	168,5	167,5	166,5	165,4	164,2	163,0	161,6	160,3	158,8
376	164,7	163,8	162,8	161,7	160,6	159,4	158,1	156,8	155,4
384	161,1	160,2	159,2	158,2	157,1	155,9	154,7	153,4	152,1
392	157,6	156,8	155,8	154,8	153,7	152,6	151,4	150,2	148,9
400	154,3	153,4	152,5	151,5	150,5	149,4	148,3	147,1	145,8

Примітка. Розраховані дані для варіанта №15 з табл. 2.

Таблиця 7 - Зміна температури по перерізу в системі валок-виливниця, °С

Час, ч	Расстояние от центра валка до поверхности изложницы, мм								
	14,9	29,8	44,7	59,6	74,5	89,4	104,3	119,2	134,1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	1193,7	1193,6	1193,2	1192,3	1190,8	1188,7	1185,8	1182,3	1178,0
16	1095,6	1095,5	1095,2	1094,4	1093,2	1091,4	1089,0	1086,0	1082,3
24	1014,2	1014,2	1013,9	1013,2	1012,1	1010,5	1008,4	1005,8	1002,6
32	945,7	945,7	945,4	944,8	943,8	942,4	940,6	938,3	935,5
40	887,2	887,2	887,0	886,5	885,6	884,4	882,8	880,8	878,3
48	838,7	838,6	838,5	838,0	837,3	836,3	834,9	833,2	831,1
56	798,4	798,4	798,2	797,9	797,3	796,4	795,3	793,9	792,2
64	770,3	770,3	770,3	770,1	770,0	769,6	769,0	768,1	766,8
72	765,4	765,4	765,2	764,7	763,9	762,8	761,3	759,3	757,0
80	758,8	758,8	758,5	758,0	757,0	755,6	753,9	751,9	749,5
88	730,3	730,3	730,2	729,8	729,2	728,3	727,2	725,8	724,0

Примітка. Розраховані дані для варіанта №18 з табл. 2.

При аналізі математичної моделі НДС встановлено, що зі збільшенням діаметра вилівка максимальне розтягувальне напруження мають менші за розміром. При охолодженні валка Ø800 мм протягом 80 год (за прийнятою

технологією 72 год) в центрі валка температура досягає 400°C. При 400°C у валка Ø800 мм розтягувальні напруження становлять 200МПа і зона їх за обсягом істотна. При цьому в процесі їх охолодження у формі напруження змінюють свій знак. Розрахунковим методом встановлено, що для виливків Ø1060 мм і, в деяких випадках, для Ø800 мм напруження двічі змінюють свій знак, що добре видно за п'ятим варіантом (табл.3): стискаюче - 146 МПа відповідає 74,4 год, а розтягуюче 116 МПа - 35,2 год, наприкінці розтягуюче напруження досягає 50МПа. Тобто спочатку йде розтягування до 116 МПа, потім стискання до -146МПа, яке доходить до 50 МПа. Для Ø800 мм отримано 4 варіанти з напруженням розтягування, що наближається до 200МПа (21, 22, 24 та 32-варіанти), а для Ø1060мм лише один такий варіант (№11). Зменшення товщини кокіля не збільшує кількість таких варіантів. Великі розтягуючі напруження спостерігаються при охолодженні вилівка у формі ≤ 48 год. Аналізуючи отримані результати встановлено, що висока швидкість охолодження вилівка (№№1, 11, 22, 32, 33) призводить до великих напружень, обумовлених значним температурним градієнтом за перерізом валка. Виконано аналіз числа змін знаків напружень (Nз) за перерізом листопрокатних валків. Для валків з Ø800мм – 3 зміни знаку за температури кокілю 140°C; Ø1060 мм - майже всі варіанти кристалізуються зі зміною знаку напруження, виключаючи №№ 1,14 і 19. Виникнення напружень різного знаку за перерізом вилівка при кристалізації може негативно впливати при експлуатації валка. Це потрібно враховувати при призначенні параметрів термообробки.

За результатами моделювання можна відзначити наступне. Виявлено чинники, що сприяють формуванню напружено деформованого стану в масивних виливках прокатних валків. Основною причиною виникнення залишкових напружень є неоднорідність деформованого стану, що пов'язана зі змінним перебігом кристалізації за часом різних зон валка. Встановлено значущі чинники, що є причиною появи цієї неоднорідності: температурний градієнт; напруження II роду; фазові перетворення, зокрема формування залишкового аустеніту.

Оскільки експериментальні методи визначення НДС в тілі масивних виливків при кристалізації чавуну утруднені через складність та дорожнечу проведення експериментів, була розроблена математична модель термомеханічних процесів, що відбуваються при кристалізації, що включає розрахунок температурного та напружено-деформованого станів.

Виконано теоретичні дослідження щодо впливу товщини кокілю, товщини шару теплоізоляційного покриття форми, її температури перед розливом і металу, що розливається, у форму на швидкість кристалізації. Встановлено, що найбільше впливають вихідна температура розливу (досліджували інтервали $t_{\text{розл}}=1320-1430^{\circ}\text{C}$), час охолодження вилівка ($\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год.), товщина кокілю (100-300мм), товщина шару теплоізоляційного покриття форми (4-20мм). Значеннями, при яких швидкість кристалізації вилівка є максимальною, для валків $\varnothing 800\text{мм}$ ($\tau_{\text{крист.}}=6,8\text{год.}$) - $t_{\text{розл}}=1410^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=150\text{мм}$; $h_{\text{н}}=6,2\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=48\text{год.}$; $\varnothing 1060\text{мм}$ ($\tau_{\text{крист.}}=10,4\text{год.}$) - $t_{\text{розл}}=1430^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=100\text{мм}$; $h_{\text{н}}=4,5\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=72\text{год.}$ Таким чином, зі зміною температури розливу металу, товщини кокіля, шару теплоізоляційного покриття форми і часу охолодження вилівки можна істотно регулювати швидкість кристалізації. З проведеного аналізу видно, що температура кокілю перед розливом металу (інтервал нагріву $t_{\text{кок}}=100-180^{\circ}\text{C}$) практично не впливає на умови кристалізації. Проте, в результаті проведеного аналізу встановлено, що висока швидкість охолодження вилівка призводить до виникнення великих напружень обумовлених значними температурними градієнтами перерізу валка.

На підставі 42 варіантів розрахунків за рішенням одномірної задачі при охолодженні виливків встановлено, що для валків $\varnothing 800$ мм максимальні розтягуючі напруження виникають на $3/4$ радіусу, а для валків $\varnothing 1060$ мм - на поверхні. Отримано рівняння лінійної залежності для прогнозу утворення максимального рівня розтягуючого та стискаючого напружень зовнішнього шару, часу їх дії, максимального показника напруженого стану, а також числа змін знаку напруження впродовж радіусу та товщини розтягнутого шару від основних технологічних параметрів (діаметра вилівки, товщини кокіля, часу

охолодження виливки, температури розливання, вихідної температури кокіля) при кристалізації виливка у формі.

Встановлено, що найбільший вплив на рівень розтягуючого зовнішній шар напруження оказують діаметр виливка ($D_{\text{відл}}$), товщина кокілю ($h_{\text{кок}}=100-300\text{мм}$), час охолодження виливка (досліджений інтервал $\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год) і температура кокілю перед розливкою металу ($t_{\text{кок}}=100-180^{\circ}\text{C}$). При цьому значеннями, за яких $\sigma_{\text{ост.розт.макс}}$ є мінімальним (77МПа), відповідають $D_{\text{відл}}=1060\text{мм}$; $h_{\text{кок}}=100\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=54\text{ч.}$; $t_{\text{кок}}=140^{\circ}\text{C}$.

Найбільший вплив на час дії максимального напруження розтягування зовнішнього шару ($\tau_{\text{макс.розт.}}$), оказують товщина кокілю ($h_{\text{кок}}=100-300\text{мм}$), час охолодження виливка (досліджений інтервал $\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год), температура розливки металу ($t_{\text{розл}}=1320-1430^{\circ}\text{C}$) і температура кокілю перед розливкою металу ($t_{\text{кок}}=100-180^{\circ}\text{C}$). Значеннями, за яких тривалість $\tau_{\text{макс.розт.}}$ є мінімальною (27,6 год), відповідають $h_{\text{кок}}=150\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=60$ год; $t_{\text{розл}}=1380^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{кок}}=140^{\circ}\text{C}$.

Встановлено, що найбільший вплив на рівень максимальних напружень стискання на зовнішні шари надають діаметр виливка ($D_{\text{відл}}$), товщина кокіля ($h_{\text{кок}}=100-300\text{мм}$) і час охолодження виливка ($\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год). Значеннями, у яких $|\sigma_{\text{макс.ст.}}|$ є мінімальним (12МПа), відповідають $D_{\text{відл}}=800\text{мм}$; $h_{\text{кок}}=100\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=48\text{год}$.

Найбільший вплив на час дії максимального стискаючого напруження зовнішнього шару ($\tau_{\text{макс.ст.}}$), мають діаметр виливка ($D_{\text{відл}}$) і час охолодження його у формі ($\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год). Значення, за яких $\tau_{\text{макс.ст.}}$ є мінімальним (44 год): $D_{\text{відл}}=800\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=60\text{год}$.

Встановлено, що найбільший вплив на рівень максимального показника напруженого стану ($\sigma_{\text{макс.напр.}}$) надають діаметр виливка ($D_{\text{відл}}$), температура розливання металу (досліджуваний інтервал $t_{\text{розл}}=1320-1430^{\circ}\text{C}$), час охолодження виливка ($\tau_{\text{вийм}}=24-110$ год) і температура кокіля перед розливанням металу ($t_{\text{кок}}=100-180^{\circ}\text{C}$). Час вилучення виливки з кокілю, а також температура перегріву металу та розливання сильно впливають на її напружений стан і ці два фактори сумарно можуть підвищувати рівень напружень приблизно на 33%. Причому для

валка Ø800мм товщина кокілю не впливає, а для Ø1600 мм мало впливає на рівень напружень.

Показано, що при кристалізації має місце наявність напружень різного знаку по перерізу валка: для виливків Ø1060 мм та, в деяких випадках, для Ø800 мм напруження двічі змінюють свій знак, наприклад, для виливки з $D_{\text{відл}}=1060\text{мм}$; $t_{\text{розл}}=1380^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=100\text{мм}$; $t_{\text{кок}}=140^{\circ}\text{C}$; $\tau_{\text{вийм}}=72\text{год}$: стискаюче - 146 МПа відповідає 74,4 год, розтягуюче 116 МПа відповідає 35,2 год, остаточне розтягуюче напруження 50МПа. Тобто спочатку йде розтяг до 116 МПа, потім стискання до - 146МПа, яке потім переходить в розтяг до 50 МПа. Для Ø800 мм отримано 4 варіанти з напруженням розтягування, що наближається до 200МПа, а для Ø1060мм лише один такий варіант. Зменшення товщини кокілю не збільшує кількість таких варіантів. Великі напруження розтягування спостерігаються у випадках з часом охолодження виливка у формі меншим 48ч. Наявність напружень різного знаку по перерізу валка може негативно вплинути на експлуатацію. Внаслідок цього, є необхідним розробка регламентованих режимів термічної обробки, а також вибір оптимальних параметрів технології виготовлення виливків.

Визначено оптимальні значення параметрів, з точки зору отримання найменшого значення максимального показника напруженого стану, для валків при Ø1060мм: $t_{\text{розл}}=1420^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{кок}}=140^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=100\text{мм}$; $h_{\text{н}}=4,5\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=72\text{год}$ (при цих значеннях наприкінці розрахунку повністю відсутня деформація розтягування зовнішнього шару); при Ø800мм: $t_{\text{розл}}=1410^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{кок}}=200^{\circ}\text{C}$; $h_{\text{кок}}=150\text{мм}$; $h_{\text{н}}=6,2\text{мм}$; $\tau_{\text{вийм}}=60\text{ч}$ (товщина розтягнутого зовнішнього шару - 60мм).

REFERENCES

1. Plant Growth Regulators - Agribusiness Today (2011, March 9). Agribusiness today. <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/109-rehuliatory-rostu-roslyn.html>
2. Sh. Jahan, Sh. Rautela. Chapter 16 - Role of phytohormones in mitigating the harmful impacts of hazardous and trace materials on agricultural crops. Hazardous and Trace Materials in Soil and Plants. Academic Press. 2022, 231-246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91632-5.00001-X>
3. Phytohormones stimulants for plants. The role of phytohormones in plant life. Proposal - The main journal on agribusiness issues. <https://propozitsiya.com/articles/ahrokhimiya-inshe/rol-fitohormoniv-u-zhyttyediyalnosti-roslyn>
4. Vedenichova N. P., Kosakivska I. V. Cytokinins as regulators of plant organ growth under different conditions of existence; edited by M. M. Musienko. Institute of Botany named after M. G. Kholodny of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv. 2017. 200 p.
5. Kur'yata V. G. Plant physiology. part 2, tutorial. Manual for students of full-time and part-time studies in the specialty "Biology". Vinnytsia: "Hypanis". 2006. 105 p.
6. Moskalenko O. V. Synthesis and antiviral activity of new 1,3,5-triazine derivatives: master's thesis. Nizhyn: Nizhyn State University named after Mykola Gogol, 2020. 57 p.
7. Poltoratska D. O. Synthesis and search for biologically active compounds among derivatives of 6-alkyl-[1,2,4]-triazin-5-ones: master's thesis. Nizhyn: Nizhyn State University named after Mykola Gogol, 2023. 53 p.
8. Synthesis of new hybrid molecules with fragments of 1,3,5-triazine and hydroquinone. Quy, D. V. et al. Chem Chem Tech. 2023. T66(4).17–26. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236604.6802>
9. Phytopharmacology: textbook / Yevtushenko M. D. et al.; Edited by professors Yevtushenko M. D., Maryutina F. M. Kyiv: Higher Education, 2004. 432 p.
10. Plant protection products against harmful organisms: a manual / S. V. Stankevych et al. Zhytomyr: Ruta Publishing House, 2023. 428 p.
11. Abd El-Moneim M., Hasanen J. A., El-Deen I. M., Abd El-Fattah W. Synthesis of used 1,2,4-triazines as potential antimicrobial and antitumor agents. Res. Chem.Intermed. 2015. No. 6. P. 3543-3561
12. Effect of biosurfactants on crude oil desorption and mobilization in a soil system / M. S. Kuyukina et al. Environment International. 2005. Vol. 31, no. 2. P. 155–161. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.09.009>

13. Development of technology for obtaining biocidal preparations of a wide range of applications: report on scientific and technical work under contract No. DZ/154-2016 dated 21.10.2016 and additional agreement No. 1 dated 14.04.2017 / Novikov V.P. et al. Lviv: National University "Lviv Polytechnic", 2017. 277 p.
14. Environmental applications of biosurfactants: Recent advances / M. Pacwa-Płociniczak et al. International Journal of Molecular Sciences. 2011. Vol. 12, no. 1. P. 633–654. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms12010633>
15. Combined solutions using biosurfactants based on water-insoluble biologically active compounds / A. Prokopalo et al. Chemistry, Technology and Application of Substances. 2022. Vol. 5, no. 1. P. 96–101. URL: <https://doi.org/10.23939/ctas2022.01.096>
16. Karpenko O. V. Gramineae plants growth stimulation by surface-active rhamnolipids. Biotechnologia Acta. 2013. Vol. 6, no. 6. P. 94–99. URL: <https://doi.org/10.15407/biotech6.06.094>
17. Chen, X., et al. (2024). Urban Planning Based on Intelligent Computing Three-Dimensional Auxiliary System. PMC NCBI.
18. Carey Business School, Johns Hopkins University. (n.d.). AI and the Future of Cities.
19. CTC Software. (2024). Autodesk® Civil 3D® for Urban Planners: A Game Changer in City Design. CTC Software Blog.
20. Dassault Systèmes. (n.d.). Generative Design in Architecture, Engineering & Construction.
21. Department of Urban and Regional Planning, University of Florida. (n.d.). AI and Cities: An International Forum for Innovation and Collaboration.
22. DIBS42. (n.d.). Building the Future: How BIM Technology is Transforming City Planning. DIBS42 Blog.
23. E-Mosty. (2021). ISSUE 03/2021 SEPTEMBER.
24. EMAY Engineering. (n.d.). Customer Success Story. Autodesk.
25. ENECA. (2024). Автоматизация проектирования генерального плана с помощью AutoCAD Civil 3D. ЭНЭКА Новости.
26. Esri. (n.d.). ArcGIS for Autodesk Forma.
27. Esri. (n.d.). The Importance of Industry Foundation Classes as a Means of Data Exchange for Spatially Enabled Projects. Esri Industries.
28. Esri Thailand. (202X, February 21). 6 Case Studies on Digital Twins.
29. European Investment Bank. (n.d.). ISTANBUL UNDERGROUND RAIL NETWORK II.

30. Fraser, J., & Bjornsson, H. (2004).
31. Gartner. (n.d.). Technologies Supporting a Digital Twin of an Organization - Reviews.
32. Gectaro. (n.d.). Интернет вещей на строительных объектах: примеры и перспективы.
33. Geng, L., et al. (2020).
34. Genplans.ru. (n.d.). 3D модели генпланов.
35. Hagerman & Company. (2025). How Civil 3D's BIM and GIS Integration Enhance Project Delivery and ROI. Hagerman Blog.
36. Hussain, F., et al. (2018).
37. International Association for Impact Assessment. (2023). Generative Urban Design Smart Resilience Cities. Alshuwaikhath, H.
38. Kaarwan. (n.d.). Case Study: Transforming Urban Landscapes with Parametric Design.
39. Kumar, S., Singh, S. K., & Gupta, A. (2025). Mapping building information modeling (BIM) and sustainability in real estate: a scientometric analysis. *International Journal of Construction Management*, 25(1), 1-19.
40. Liu, Y., et al. (2023). Research on Fusion Method of BIM and GIS Considering Micro-level Entity Objects and Macro-level Geographic Scene. *Proceedings of the 2023 International Conference on Computer Science, Engineering and Applied Technology (ICCSEAT 2023)*. Atlantis Press.
41. Liu, Y., et al. (2024). The roles of AI and BIM in assisting designers to make sustainable decisions at building and city levels. *MDPI Sustainability*, 16(24), 10848.
42. López, F., et al. (2024). Integrating BIM and GIS for an Existing Infrastructure. *Applied Sciences*.
43. Ma, L., Azari, R., & Elnimeiri, M. (2023). The case study Revit structural model. ResearchGate.
44. Mapsted. (n.d.). How IoT Solutions Are Transforming Smart Cities.
45. Masterskaya Plana. (n.d.). Архитектурная визуализация: методы, технологии и инструменты создания реалистичных изображений. Mastersplan.ru.
46. McKinsey & Company. (2023, June 14). The economic potential of generative AI: The next productivity frontier.
47. Mezzoteam. (2025). What is IFC BIM and how to use it in construction projects?
48. Milvus.io. (n.d.). What role does AR play in urban planning and development?
49. Miring Group. (n.d.). Проектирование в Revit. Miringgroup.com.

50. Nasuni. (2025, April 22). Nasuni Drives Cloud Transformation in Architecture, Engineering, and Construction (AEC) Sector to Support Demand for Modern Data Infrastructure.
51. Novatr. (n.d.). Autodesk Construction Cloud (ACC): The Complete Guide You Need.
52. Omega Render. (n.d.). Urban Design Rendering. Omegarender.com.
53. OneMind Technologies. (2025, May 29). Real-Time Data for Smart Cities Operations - OneMind NG.
54. Othengrafen, F., Sievers, L., & Reinecke, E. (2025). From Vision to Reality: The Use of Artificial Intelligence in Urban Planning. Cogitatio Press Urban Planning, 10.
55. Paris & Métropole Aménagement. (n.d.). Accueil.
56. Pérez-del-Hoyo, R., et al. (2025). Empowering vulnerable communities: A methodology for social participation of children in urban projects using virtual reality. Journal of Urban Design and Planning.
57. Pingax. (n.d.). IoT Sensor Data Integration for Smart City Planners and Developers.
58. PlanRadar. (n.d.). Информационные технологии в строительстве: самые востребованные.
59. Plebankiewicz, E., Zima, K., & Wieczorek, D. (2021). BIM Application in Infrastructure Projects: A Bibliometric Analysis. Sustainability, 13(5), 2829.
60. Plotree Inc. (Plotzy.ai). (n.d.). How AR Transforms Urban Planning.
61. PointCAD. (n.d.). Экспорт и импорт моделей между 3dsMax и AutoCAD. Pointcad.ru.
62. Prota Engineering. (n.d.). Atakoy – Ikitelli Metro Line.
63. Prota Software. (n.d.). Innovation To Design.
64. Revizto. (2025). Top 20 Most Inspiring BIM Projects.
65. Sadeghian, P., & Sadeghian, S. (2024). The role and impact of virtual reality in participatory urban policymaking. International Journal of Human-Computer Interaction.
66. Saleh, W. A. M., et al. (2024). How IoT can help to reduce the effects of climate change, minimize the losses, and improve the restoration processes. International Journal of Scientific Research and Advances.
67. Sapr.ru. (2018). Autodesk Revit + Autodesk 3ds Max Design: эффективная связка для архитектурной визуализации.
68. Scribd. (2025). Investigation of BIM Perception in Metro.
69. Severnik. (2024). Создание схемы генплана в Revit. Severnik's Blog.

70. Softculture. (n.d.). Как делать расчёт инсоляции и КЕО. Softculture.cc.
71. SoftwareONE. (2025). Autodesk 3ds Max: The versatile solution for design visualisation and M&E. SoftwareONE Blog.
72. SPbPU. (2017). Применение программного комплекса AutoCAD Civil 3D для проектирования генеральных планов и автомобильных дорог. AlfaBuild Journal.
73. Stehle, S., & Kitchen, R. (2020).
74. Stride, M., Newton, S., & Fay, C. (2020). The use of building information modelling by quantity surveyors in facilities management roles. *Journal of Facilities Management*, 18(4), 367-383.
75. Sweco. (n.d.). Randselva Bridge | BuildingPoint Scandinavia.
76. Techtur Global. (n.d.). What is Revit Software: An In-Depth Overview. Techtur Blog.
77. The Atlanta Regional Commission. (n.d.). Digital Twins: A New Tool for Regional Collaboration and Insight.
78. Timeweb. (n.d.). ТОП-35 курсов 3ds Max: обучение визуализации и моделированию для начинающих. Timeweb Community.
79. Transit Costs Project. (n.d.). Understanding Transit Infrastructure Costs in American Cities.
80. TrustRadius. (2021-2025). Autodesk BIM Collaborate Pro Reviews.
81. U.S. CAD. (2024). Transforming Civil Projects: The Power of Autodesk BIM Collaborate Pro. USCAD Blog.
82. UN-Habitat. (2020).
83. United-BIM. (2024, May 22). Why U.S. Government Mandates BIM for Infrastructure Projects.
84. University of Carleton. (n.d.). Parametric Urbanism.
85. Uroki-Revit.ru. (2025). Построение генплана в Revit. Autocad-specialist.ru.
86. Usman, H. (2021). CIM The Application of City Information Modelling (Master's thesis, Politecnico di Milano).
87. Vakili, K., et al. (2024). Artificial intelligence in geo-design and urban planning: A systematic review of current trends and future directions. *MDPI ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(3), 835.
88. Wall, M. (2008). Energy Savings by Using Daylight in Town Planning. Diva Portal.
89. Westerveld, L., et al. (2025). Smart city data platforms: Integrating data for urban management. *Frontiers in Sustainable Cities*.

90. Yu, W., Zhou, X., Dong, J., & Wang, D. (2024). The Development and Construction of City Information Modeling (CIM): A Survey from Data Perspective. *Applied Sciences*, 15(9), 4696.
91. Zhang, Y., Li, N., & Li, H. (2024). The Role of BIM and CIM in Sustainable Urban Renewal: A Review. *Sustainability*, 15(5), 833.
92. Белова, І. Ю. Адаптація історичних будівель під готельні функції: проблеми та перспективи // Вісник Харківської державної академії дизайну і мистецтв. — 2021. — №3. — С. 45–52.
93. Ковальчук, А. В. Ревіталізація історичних об'єктів в умовах сучасного міста // Сучасні проблеми архітектури та містобудування. — 2020. — №58. — С. 112–117.
94. Плахотна, Н. О. Історичне середовище як об'єкт архітектурного втручання // Архітектурний вісник КНУБА. — 2019. — Вип. 20. — С. 74–80.
95. Hotel de Crillon, A Rosewood Hotel – History and Restoration. [Електронний ресурс] — Офіційний сайт Rosewood Hotels. — Режим доступу: <https://www.rosewoodhotels.com/en/hotel-de-crillon>
96. The Gritti Palace, Venice – A Luxury Collection Hotel. [Електронний ресурс] — Marriott International. — Режим доступу: <https://www.marriott.com/en-us/hotels/vcelc-the-gritti-palace>
97. 11 Mirrors Design Hotel, Kyiv. [Електронний ресурс] — Офіційний сайт готелю. — Режим доступу: <https://www.11mirrors-hotel.com/>
98. Hotel Indigo London – Paddington. [Електронний ресурс] — InterContinental Hotels Group. — Режим доступу: <https://www.ihg.com/hotelindigo>
99. Ситник, О. С. Готель як інструмент ревіталізації історичної спадщини міста // Наукові записки НаУКМА. Архітектура і містобудування. — 2022. — Т. 5. — С. 53–59.
100. ІКОМОС Україна. Хартія про збереження історичних міст. — Київ, 2008. — 16 с.
101. UNESCO World Heritage Centre. [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://whc.unesco.org>
102. Каплін М.І., Макаров В.М., Білан Т.Р. Балансово-оптимізаційна модель взаємодії енергетики з паливними галузями ПЕК України з урахуванням європейських екологічних норм. Проблеми загальної енергетики. 2018, 1(52). 5–11.
103. Babak, V. P.; Kulyk, M. M. Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation Through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation* 2023, 19(5), 100-116.

104. Бабак В., Нікітін Є., Тесленко О. Цілісний підхід до системної трансформації електроенергетики, централізованого теплопостачання та комунальної інфраструктури. Системні дослідження в енергетиці. 2024, 4 (80). 6–25.
105. Макаров В.М. Математична модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування в Україні. Проблеми загальної енергетики. 2017, 1(48). 16-23.
106. Маляренко О.Є. Показники енергоекономічного аналізу для визначення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів у багатопродуктових виробництвах промислової продукції. Проблеми загальної енергетики. 2010, 1 (21), 40-46.
107. Маляренко О.Є. Методичний підхід до визначення прогнозної структури споживання первинного палива. Проблеми загальної енергетики. 2016, 3 (46), 28-39.
108. Denysov V., Babak V., Zaporozhets A., Nechaieva T., Kostenko G. Quasi-dynamic Energy Complexes Optimal Use on the Forecasting Horizon. Systems, Decision and Control in Energy VI: Volume I: Energy Informatics and Transport. Springer, Cham. 2023. 81-107.
109. Макаров В.М., Білан Т.Р., Каплін М.І. Математичні моделі оптимізації обсягів постачання вугілля в економіку країни з урахуванням вимог енергетичної безпеки. Економічна безпека національного енергетичного сектору в умовах глобалізації: колективна монографія / За заг. ред. О.Л. Гальцевої. – Запоріжжя: Видавничий дім «Гельветика», 2020. 88-104.
110. Makarov V.M. Forecasting the development of the coal industry taking into account environmental constraints. Economic Development: Global Trends and National Peculiarities. Collective monograph. Poland: Baltija Publishing, 2020. 100-118.
111. Макаров В., Каплін М., Білан Т., Перов М. Прогнозування обсягів видобутку вугілля в Україні. Системні дослідження в енергетиці. 2023. 1 (72). 35-45.
112. Makarov V., Kaplin M., Perov M., Bilan T., Maliarenko O.: Optimization of Coal Products Supply for the Power Industry and the Country's Economy. In: Zaporozhets A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control, Springer, Cham. 2023. vol 481. P. 87-98.
113. Стогній О.В., Макаров В.М., Каплін М.І., Білан Т.Р. Визначення оптимальної марки вугілля ТЕЦ при переведенні їх котлоагрегатів на пиловугільне спалювання. Проблеми загальної енергетики. 2013, 1. 28-37.
114. Novoseltsev, O., Kovalko, O., Evtukhova, T. Cross-border cooperation of energy service companies as a factor enhancing energy and economic safety. Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems - Proceedings of the International Forum on Energy Efficiency, 2013.

115. Makarov, V., Kaplin, M., Bilan, T., Perov, M. Modeling the coal industry technological development considering environmental restrictions. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 346. Springer, Cham. 2021. P. 153-166.
116. Shulzhenko S., Kostyukovskyi B., Maliarenko O., Makarov V., Bilenko M.: Thermal Power Plants' Coal Stock Short Term Projection Method for Ensuring National Energy Security. In: Zaporozhets A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 454. Springer, Cham. 2023. P. 279-289.
117. Makarov V.M., Perov M.O. Scenarios for the development of the coal industry with projected changes in the structure of the use of coal products in the country economy. *The Problems of General Energy*, 2022. 1-2 (68-69), 70-81.
118. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях. – К.: Наукова думка, 1987. – 198 с.
119. Стогній О.В., Каплін М.І. Структурні особливості балансово-оптимізаційної моделі паливозабезпечення країни. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2011. Спец. вип., Ч. 1. 138–145.
120. Agriculture, technical and applied sciences: main problems and solutions: collective monograph / Reznichenko V., Kolomiets L., Kornicheva H. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2025. 511 p.
121. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
122. Chatziantoniou, I.; Filippidis, M.; Filis, G.; Gabauer, D. A closer look into the global determinants of oil price volatility. *Energy Econ.* 2021, 95, 105092.
123. Ni, Y.; Day, M.Y.; Cheng, Y.; Huang, P. Can investors profit by utilizing technical trading strategies? Evidence from the Korean and Chinese stock markets. *Financ. Innov.* 2022, 8, 54.
124. Day, M.Y.; Cheng, Y.; Huang, P.; Ni, Y. The profitability of trading US stocks in Quarter 4-evidence from trading signals emitted by SOI and RSI. *Appl. Econ. Lett.* 2023, 30, 1173–1178.
125. Kedar-Levy, H. Price discovery in the small and in the large: Momentum and reversal, bubbles, and crashes. *J. Financ. Mark.* 2020, 48, 100505.
126. Husain, A.; Karim, S.; Sensoy, A. Financial fusion: Bridging Islamic and Green investments in the European stock market. *Int. Rev. Financ. Anal.* 2024, 94, 103341.
127. Pring, M.J. *Study Guide for Technical Analysis Explained*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2002.
128. Reis, P.M.N.; Pinho, C. A reappraisal of the causal relationship between sentiment proxies and stock returns. *J. Behav. Financ.* 2021, 22, 420–442.

129. Kouaissah, N.; Hocine, A. Forecasting systemic risk in portfolio selection: The role of technical trading rules. *J. Forecast.* 2021, 40, 708–729.
130. Zaharudin, K.Z.; Young, M.R.; Hsu, W.H. High-frequency trading: Definition, implications, and controversies. *J. Econ. Surv.* 2022, 36, 75–107.
131. Clacher, I.; Osmá, B.G.; Scarlat, E.; Shields, K. Do commonalities facilitate private information channels? Evidence from common gender and insider trading. *J. Corp. Financ.* 2021, 70, 102062.
132. Kyriakarakos, G. Artificial Intelligence and the Energy Transition. *Sustainability* 2025, 17, 1140. <https://doi.org/10.3390/su17031140>.
133. Marzban, S.; Delage, E.; Li, J.Y.-M. Deep reinforcement learning for option pricing and hedging under dynamic expectile risk measures. *Quant. Financ.* 2023, 23, 1411–1430. <https://doi.org/10.1080/14697688.2023.2244531>.
134. Konstantelos, I.; Giannelos, S.; Strbac, G. Strategic valuation of smart grid technology options in distribution networks. *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, 32, 1293–1303. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2016.2587999>.
135. Deng, J.L. Control problems of grey systems. *Syst. Control Lett.* 1982, 1, 288–294.
136. Dos Reis, J.R.; Tabora, J.M.; de Lima, M.C.; Monteiro, F.P.; Monteiro, S.C.D.A.; Bezerra, U.H.; Tostes, M.E.D.L. Medium and long term energy forecasting methods: A literature review. *IEEE Access* 2025, 13, 29305–29326. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3540999>.
137. Pannakkong, W.; Vinh, V.T.; Tuyen, N.N.M.; Buddhakulsomsiri, J. A reinforcement learning approach for ensemble machine learning models in peak electricity forecasting. *Energies* 2023, 16, 5099. <https://doi.org/10.3390/en16135099>.
138. Famoso, F.; Oliveri, L.M.; Brusca, S.; Chiacchio, F. A Dependability Neural Network Approach for Short-Term Production Estimation of a Wind Power Plant. *Energies* 2024, 17, 1627. <https://doi.org/10.3390/en17071627>.
139. Tekhnichnyy zvit «Rezhymno-nalahodzhuval'ni vyprobuvannya kotla i koryhuvannya rezhymnykh kart. kotel TPP – 312A st. № 3 Vuhlehirs'koyi TES, inv..№ 032, TOV «SPETSTERMOMONTAZH-ENERHO», 2020.
140. Analiz variantiv ta rozrakhunkove obgruntuvannya tekhnichnykh rishen' dlya podal'shoi rozrobky ta realizatsiyi proektu «Tekhnichne pereosnashchennya kotloahrehatu st. №4 Trypil's'koyi TES v chastyni vykorystannya neproektnoho palyva (vuhillya marok H, DH) na vul. Promysloviy, 1, m. Ukrayinka Obukhivs'koho rayonu Kyiv's'koyi oblasti»: Zvit pro NDR za dohovorem № 15/17 vid 31.05.2017 (zaklyuchnyy) / Nauk. kerivnyk Chernyavs'kyy M.V. – Kyiv, IVE NAN Ukrayiny, 2017.
141. Chernyavs'kyy M.V. Istoriya i perspektyvy vykorystannya vuhillya na TES Ukrayiny z ohlyadu na metu skorochnyya vykydiv parnykovykh haziv / M.V.

Chernyavs'kyi, O.V. Moiseyenko, T.M. Monastyr'ova // 13-a Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Vuhil'na teploenerhetyka: shlyakhy rekonstruktsiyi ta rozvytku»: Zb. nauk. prats'. – Kyiv: IVE NAN Ukrainy, 2017. – S. 21-27.

142. HKD 34.20.507-2003 Tekhnichna ekspluatatsiya elektrychnykh stantsiy i merezh. Pravyla (u redaktsiyi nakazu Nakazu Ministerstva enerhetyky ta vuhil'noyi promyslovosti Ukrainy vid 21.06.2019 № 271).

143. Lys S. Analysis of Methods for Extending the Life Cycle of a TP-100A Boiler / Stepan Lys, Oksana Yurasova, Nadiya Lashkovska // Scientific journal “Energy Engineering and Control Systems”. – Lviv, 2018. – Volume 4, Number 1. – P. 1–8.

144. Guoli Qi, Songsong Zhang, Xuemin Liu, Jian Guan, Yongqiang Chang, Zhongwei Wang, Combustion adjustment test of circulating fluidized bed boiler, Applied Thermal Engineering, Volume 124, 2017, Pages 1505-1511, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.005>.

145. Weiwei Zhang, Yi Liu, Donghui Yuan, Jun Rong, Ningning Hu, Yuye Chen, Jianlong Ma, Adjustment algorithm of damper openings of tangentially fired boilers based on secondary air distribution, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 64, 2024, 105454, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105454>.

146. Chunxing Xu, Meishuang Li, Combustion adjustment experiment of over-temperature in heating surfaces for 600 MW four-wall tangentially fired boiler, Energy Reports, Volume 8, Supplement 8, 2022, Pages 472-482, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.155>.

147. Chen Yang, Li Sun, Xiaosheng Wang, Zonglong Zhang, Online tracking simulation system for a 660 MW Ultra-Supercritical circulating fluidized bed boiler based on mechanistic models and artificial neural network models, Applied Thermal Engineering, Volume 270, 2025, 126183, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126183>.

148. Katarzyna Rychlewska, Jacek Żeliński, Katarzyna Matuszek, Piotr Hrycko, Jolanta Telenga-Kopczyńska, Estimation of emission factors from residential Ecodesign boilers considering characteristic phases of their operation, Environmental Pollution, Volume 370, 2025, 125863, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125863>.

149. Chunying Wu, Lingfang Sun, Heng Piao, Lijia Yao, Adaptive fuzzy finite time integral sliding mode control of the coordinated system for 350 MW supercritical once-through boiler unit to enhance flexibility, Energy, Volume 302, 2024, 131832, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131832>.

150. Альошин Г.В., Коломійцев О.В., Карлов Д.В. Шляхи збільшення об'ємів передачі інформації в системах супутникового космічного лазерного зв'язку. Аерокосмічні технології. – К.: НЦУВКЗ, 2017. – Вип. 1(1). – С. 64 – 68.

151. Коломійцев О.В., Клівець С.І., Бзот В.Б., Орлов С.В., Руденко Д.В. Селектор подовжніх мод для багаточастотної передачі інформації. Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2012. – Вип. 2(22). – С. 70-74.

152. Коломійцев О.В., Комаров В.О., Пашнєв А.А., Пустоваров В.В., Запара Д.О., Белоус М.В., Хабоша С.М., Сальник О.В., Павлій Л.В., Воробйов О.Г., Любченко О.В. Метод передачі даних у технології остання миля на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією подовжніх мод лазерного випромінювання. Scientific Collection «InterConf+», 46(205): with the Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference «Current Issues and Prospects for The Development of Scientific Research» (June 19-20, 2024; Orléans, France) / comp. by LLC SPC «InterConf». Orléans: Epi, 2024. – pp. 517-530. – DOI 10.51582/interconf.19-20.06.2024.
153. Коломійцев О.В., Третьак В.Ф., Катунін А.М., Комаров В.О., Філіппенков О.В., Брянкін С.С., Сафарова Г.М., Хабоша С.М., Сядристий С.І., Олійник Н.О., Любченко О.В., Ясинський О.М. Метод збільшення об'єму передачі даних у атмосферно-оптичній лінії зв'язку для технології остання миля. ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал. – Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2024. – No 41. – С. 244-256. – DOI 10.36074/grail-of-science.05.07.2024.038.
154. Коломійцев О.В., Комаров В.О., Рисований О.М., Катунін А.М., Сидоров В.В., Брянкін С.С., Землянський Д.О., Лук'янюк Р.А., Хроль Л.О., Тітова А.В., Любченко О.В. Пристрій для передачі даних у атмосферно-оптичній лінії зв'язку для технології остання миля. ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2024. – No 42. – С. 366-376. – DOI 10.36074/grail-of-science.02.08.2024.
155. Коломійцев О.В., Любченко О.В. Спосіб для передачі великих об'ємів даних по каналах мережевого зв'язку на основі лазерного випромінювання. ГРААЛЬ НАУКИ : міжнар. наук. журнал. – Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2025. – No 51. – С. 606-616. – DOI 10.36074/grail-of-science.18.04.2025.
156. Shmatko, O., Kolomiitsev, O., Rekova, N., Kuchuk, N., & Matvieiev, O. . (2023). Designing and evaluating dl-model for vulnerability detection in smart contracts. Advanced Information Systems, 7(4), 41-51. – <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.05>.
157. Коломійцев О.В., Комаров В.О., Пашнєв А.А., Пустоваров В.В., Запара Д.О., Белоус М.В., Хабоша С.М., Сальник О.В., Павлій Л.В., Воробйов О.Г., Любченко О.В. Метод передачі даних у технології остання миля на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією подовжніх мод лазерного випромінювання. Scientific Collection «InterConf+», 46(205): with the Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference «Current Issues and Prospects for The Development of Scientific Research» (June 19-20, 2024; Orléans, France) / comp. by LLC SPC «InterConf». Orléans: Epi, 2024. – pp. 517-530.
158. Коломійцев О.В., Третьак В.Ф., Катунін А.М., Філіппенков О.В., Посохов В.В., Любченко О.В. Метод передачі даних у атмосферно-оптичній лінії зв'язку

для технології остання миля. Moderní aspekty vědy: XLV. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2024. str. 542. <https://doi.org/10.52058/45-2024>.

159. Коломійцев О.В., Олізаренко С.А., Любченко О.В., Коломійцев В.О. Метод передачі даних по оптичних каналах мережевого зв'язку на основі використання подовжніх мод лазерного випромінювання. XII Міжнародна науково-технічна конференція "Інформатика, управління та штучний інтелект (ІУШІ-2025)". 14-16 травня 2025 року. – Х.: НТУ «ХПІ», 2025. – С. 60.

160. Gavrylenko, S., Zozulia, V., Khatsko, N. Method of detection of intrusions based on stacking meta-algorithm. 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology, KhPIWeek 2024 – Conference Proceedings, 2024. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10878074>.

161. Gavrylenko, S., Poltoratskyi, V. Detection computer network intrusion using deep neural networks. 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology, KhPIWeek 2024 – Conference Proceedings, 2024. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10878100>.

162. Fedorchenko, V., Yeroshenko, O., Shmatko, O., Kolomiitsev, O., & Omarov, M. (2024). Password hashing methods and algorithms on the .net platform. Advanced Information Systems, 8(4), 82–92. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.11>.

163. Shmatko, O., Kolomiitsev, O., Rekova, N., Kuchuk, N., & Matvieiev, O. (2023). Designing and evaluating dl-model for vulnerability detection in smart contracts. Advanced Information Systems, 7(4), 41–51. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.05>.

164. Shmatko, O., Kolomiitsev, O., Fedorchenko, V., Mykhailenko, I., & Tretiak, V. (2023). Integrating analytical statistical models, sequential pattern mining, and fuzzy set theory for advanced mobile app reliability assessment. Innovative technologies and scientific solutions for industries, (4(26), 78–86. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.26.078>.

165. Samkharadze R. VN-network. Tbilisi, "Georgian Technical University", Proceedings. Automated Control Systems. N 2 (3), 2007. p. 40-45. ISSN 1512-3979. P. 40-45. (In Georgian)

166. Samkharadze R., Gachechiladze L. INFORMATION SYSTEM FOR TEACHING VIRTUAL MEMORY MANAGEMENT. MULTIDISCIPLINARY ACADEMIC NOTES. THEORY, METHODOLOGY, AND PRACTICE. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference. Tokyo, Japan. May 03 – 06, 2022. ISBN – 979-8-88526-741-0 DOI – 10.46299/ISG.2022.1.17.

167. Samkharadze R, Gachechiladze L. Imitation models in computer learning. International Scientific Conferences. Business Management, Economics, and Social

Sciences. 23.10.2020. Conference proceedings. Agenda Publishing House LTD · London, UK · 2020. – 204 p. ISBN 978-2-5494-0318-8

168. Samkharadze R, Gachechiladze L. VIRTUAL STORAGE MANAGEMENT VISUALIZATION ALGORITHMS. Tbilisi, GTU's "IT-consulting Scientific Center", 2017. ISBN 978-9941-0-9643-3. 93 p. (In Georgian)

169. Arms, William Y. (2000): Digital libraries, Cambridge, Massachusetts, MIT Press.

170. Волонтир Л. О. Чисельні методи: Навч. посіб. - / Л. О. Волонтир, Л. В. Зелінська, Н. А. Потапова, І. А. Чіков - Вінницький національний аграрний університет. – Вінниця: ВНАУ, 2020 – 322 с.

171. Porteous, M., Kirakowsky, J. & Corbett, M. (1993): SUMI user handbook, Human Factors Research Group, University College Cork.

172. Model Engine Timing Using Triggered Subsystems. – [Електроний ресурс]: <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/modeling-engine-timing-using-triggered-subsystems.html>

173. Crossley, P. R., and J. A. Cook. "A Nonlinear Engine Model for Drivetrain System Development." International Conference on Control 1991. Control '91 1991, pp. 921–25 vol.2. IEEE Xplore, DOI.org (Crossref), <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/98573>

174. Ruvins'ka V.M., Devyatkov V.V. Videosposterezhennya dlya system bezpeky: modeli, metody ta zaproponovani rishennya [Video surveillance for security systems: models, methods and proposed solutions]. Informatyka ta matematychni metody v modelyuvanni - Informatics and Mathematical Methods in Simulation. 2021, vol.11, no.4, pp. 331-342.

175. Videosposteregennya. Retrived from: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Videosposteregennya> (accessed 28 May 2025)..

176. Videoreestrator. Retrived from: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Videoreestrator> (accessed 28 May 2025)..

177. Robotizirovannaya kamera SpeedDome Hikvision DS-2DF8C448I5XS-AELW(T5) DarkFighter s lazernoy podsvetkoy [Robotic camera SpeedDome Hikvision DS-2DF8C448I5XS-AELW(T5) DarkFighter with laser illumination]. Available at: https://vario.com.ua/ptz-robotizirovannaya-kamera-speeddome-hikvision-ds-2df8c448i5xs-aelwt5-darkfighter-s-lazernoy-podsvetkoy/?gclid=Cj0KCQjw4omaBhDqPc554R11Rizwk_Fe8MZ6JRxC8HQB-Ail-2Jn7yc-Jp0fShCu6QaAlqCEALw_wcB ARIsADXULuUk4 (accessed 28 May 2025).

178. Osoblyvosti kamer videosposterezhennya [Features of video surveillance cameras]. Retrived from: <https://worldvision.com.ua/ru/kak-vybrat-naruzhnuu-kameru-rabotaushchuu-ot-batarei/> (accessed 28 May 2025).

179. Pedregosa. Scikit-learn: Machine Learning in Python / Journal of Machine Learning Research. - 2011. No. 12, P. 2825-2830. Retrived from: <https://www.jmlr.org/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf> (accessed 28 May 2025).
180. Simbirskii G.D. Analis metodiv viyavlennya anomalii u videoryadi kamer na transporti. /Visnik KHNADU. - Kharkiv, KHNADU. – 2022. - № 98. Retrived from: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/> (accessed 28 May 2025).
181. Videoanalitika. Retrived from: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D0%B4%D0%B5%D0%BE%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%96%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0> (accessed 28 May 2025).
182. Gorodnichy D.O. Automated video surveillance: challenges and solutions / Gorodnichy D.O., Mungham T. // ACE Surveillance (Annotated Critical Evidence) case study NATO SET-125 Symposium Sensor and Technology for Defence against Terrorism. 2008. Retrived from: https://www.researchgate.net/publication/229040125_Automated_video_surveillance_challenges_and_solutions_ACE_Surveillance_Annotated_Critical_Evidence_case_study (accessed: 28.05.2025).
183. Musienko D.I. Problemy suchasnih sistem Videoanalitiky / D.I. Musienko // Suchasna specialna tehnika. – 2014. – № 2 (37). – C. 75-81.
184. Videoanalitika ta shtuchni intelekt. Retrived from: https://www.axis.com/files/whitepaper/wp_AI_in_video_analytics_ru_2103.pdf (accessed: 28.05.2025).
185. Omar S. Machine Learning Techniques for Anomaly Detection / Omar S., Ngadi A., Jebur H.H. // An Overview. International Journal of Computer Applications. 2013. V.79. No. 2. Doi=10.1.1.402.6779. Retrived from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?&rep=rep1&type=pdf> (accessed: 28.05.2025).
186. Larose D.T. Discovering Knowledge in Data: An Introduction to Data Mining. - Wiley & Sons, New Jersey. - 2014. P. 336. ISBN: 978-0-470-90874-7. Retrived from: https://doc.lagout.org/Others/Data%20Mining/Discovering%20Knowledge%20in%20Data_%20An%20Introduction%20to%20Data%20Mining%20%282nd%20ed.%29%20%5BLarose%20%26%20Larose%202014-06-30%5D.pdf (accessed: 28.05.2025).
187. Wang Z. Cluster Attention Contrast for Video Anomaly Detection / Wang Z., Zou Y., Zhang Z. Retrived from: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3394171.3413529> (accessed: 28.05.2025).
188. Vapnik V.N. Statistical Learning Theory. - John Wiley & Sons, 1998.
189. Lamrini B. Anomaly Detection Using Similarity-based One-Class SVM for Network Traffic Characterization. Retrived from: <https://ceur-ws.org/Vol-2289/paper12.pdf> (accessed: 28.05.2025).

190. Liu F.T. Isolation Forest / Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.H. // ICDM'08. Eighth IEEE International Conference on Data Mining. 2008. P. 413-422. Retrived from: <https://cs.nju.edu.cn/zhoush/zhoush.files/publication/icdm08b.pdf?q=isolation-forest> (accessed: 28.05.2025).
191. Van den Burg. An Evaluation of Change Point Detection Algorithms Van den Burg, Gerrit J. J., Williams C.K. Retrived from: <https://arxiv.org/abs/2003.06222> (accessed: 28.05.2025)..
192. Babcock B. Models and issues in data stream systems / Babcock B., Babu S., Datar M., Motwani R., Widom J. // Proceedings of the 21st ACM Sigmod-Sigact-Sigart Symposium on Principles of Database Systems. - 2002. - P. 1–16, doi:10.1145/543613.543615. Retrived from: https://www.researchgate.net/publication/221559970_Models_and_Issues_in_Data_Stream_Systems (accessed: 28.05.2025).
193. Shtuchni Neiron. Retrived from: uk.wikipedia.org/wiki/Shtuchni_Neiron (accessed: 28.05.2025)..
194. Konstantinov M. Korotkiy kurs masinnogo navchannya abo yak stvoriti neironnu meregu. Retrived from: <https://habr.com/ru/post/340792> (accessed: 28.05.2025).
195. Khan1 A. A Survey of the Recent Architectures of Deep Convolutional Neural Networks / Khan1 A., Sohail1 A., Zahoora U., Saeed Qureshi A. // Published in Artificial Intelligence Review. – 2020. Retrived from: <https://arxiv.org/pdf/1901.06032.pdf> (accessed: 28.05.2025).
196. Y.Gavrilova. Convolutional Neural Networks for Beginners – 2021. Retrived from: <https://serokell.io/blog/introduction-to-convolutional-neural-network> (accessed: 28.05.2025).
197. Komplekt sistemy videosposterezhennya na 4 kamery. Retrived from: https://grey.com.ua/p1457679788-komplekt-sistemy-videonablyudeniya.html?gclid=Cj0KCQiAnNacBhDvARIsABnDa69rZoWWg94mQbTcZ5yLzZWRvnMMCPD7pScloLSmX4Nkh_nMaJaCoYaAvyHEALw_wcB (accessed: 28.05.2025).
198. Organisation for Economic Cooperation and Development (2010). Towards Zero: Ambitious Road Safety Targets and the Safe System Approach. Paris.
199. Dubrovik-Rohova, A. (2018) Dorogie dorogi – expensive roads. Den – Day, Vol. 60, 3. Kyiv [in Ukrainian].
200. Simbirskii G. (2020) Informaciina tehnologiiia distanciinogo prymusovogo obmezhenia shvydkosti transportnyh zasobiv dlia pidvyshennia bezpeky dorozhnogo ryhy. Avtomobil i elektronika. Sovremennyye tehnologii: elektronnoe nauchnoe spetsializirovannoe izdanie. Kharkiv, 17, 54-61. [in Ukrainian].
201. Rudyk A. (2019) V Ukraini na 25% zbilshylasia kilkist DTP cherez vodinnia v netverezomu vygliadi. Ukrainski novyny – Ukrainian News, 19.11.2019, Kyiv [in Ukrainian].

202. Simbirskii G.D. Analis metodiv viyavlennya anomalii u videoryadi kamer na transporti. /Visnik KHNADU. - Kharkiv, KHNADU. – 2022. - № 98. Retrived from: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/> (accessed 28 May 2025).
203. Shlykov V. (2018) Microprocesorna tehnika. Kyiv [in Ukrainian].
204. Modul datchika alkogolia MQ-3 v Kyivi i Ukraini arduino.ua (2020). Retrieved from: <http://arduino.ua/prod1240-modyl-datchika-alkogolya-mq-3>.
205. HLS-13F-1 Rele (12VDC) tok-20A/kontakty-1C (2020). Retrieved from: <https://kharkov.prom.ua/p608088170-hls-13f-rele.html>.
206. Bezridnyi V.V. Identifikaciya transportni zasobiv za dopomogoyu videocamer. Zbirnik naukovih prac za materialami II Mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferencii “Komputerni tehnologii i mehatronika”, Kharkiv, KHNADU. – 2020, ss. 198-201.
207. Simbirskii G.D. Analis metodiv viyavlennya anomalii u videoryadi kamer na transporti. /Visnik KHNADU. - Kharkiv, KHNADU. – 2022. - № 98. Retrived from: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/> (accessed 28 May 2025).
208. Шишацький А. В., Башкиров О. М., Костина О. М. Розвиток інтегрованих систем зв’язку та передачі даних для потреб Збройних Сил. // Науково-технічний журнал “Озброєння та військова техніка”. 2015. № 1(5). С. 35 –40.
209. V. Dudnyk, Yu. Sinenko, M. Matsyk, Ye. Demchenko, R. Zhyvotovskiy, Iu. Repilo, O. Zabolotnyi, A. Simonenko, P. Pozdniakov, A. Shyshatskyi. Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 3. No. 2 (105). 2020. pp. 37–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301>.
210. Sova, O., Shyshatskyi, A., Salnikova, O., Zhuk, O., Trotsko, O., & Hrokholskyi, Y. Development of a method for assessment and forecasting of the radio electronic environment. EUREKA: Physics and Engineering, 2021, No. 4, pp. 30-40. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001940>.
211. Pievtsov, H., Turinskyi, O., Zhyvotovskiy, R., Sova, O., Zvieriev, O., Lanetskii, B., and Shyshatskyi, A. (2020). Development of an advanced method of finding solutions for neuro-fuzzy expert systems of analysis of the radioelectronic situation. EUREKA: Physics and Engineering, No. (4), pp. 78-89. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001353>.
212. P. Zuiev, R. Zhyvotovskiy, O. Zvieriev, S. Hatsenko, V. Kuprii, O. Nakonechnyi, M. Adamenko, A. Shyshatskyi, Y. Neroznak, V. Velychko. Development of complex methodology of processing heterogeneous data in intelligent decision support systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, Vol. 4, No. 9 (106), pp. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208554>.
213. A. Shyshatskyi, O. Zvieriev, O. Salnikova, Ye. Demchenko, O. Trotsko, Ye. Neroznak. Complex Methods of Processing Different Data in Intellectual Systems for

Decision Support System. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. Vol. 9, No. 4, pp. 5583–5590 DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/206942020>.

214. Nechyporuk, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Kravchenko, S., Nalapko, O., Shknai, O., Klimovych, S., Kravchenko, O., Kovbasiuk, O., Bychkov, A. (2023). Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 2, No. 4 (122), pp. 31–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276168>.

215. Koval, V., Nechyporuk, O., Shyshatskyi, A., Nalapko, O., Shknai, O., Zhyvylo, Y., Yerko, V., Kreminskyi, B., Kovbasiuk, O., Bychkov, A. (2023). Improvement of the optimization method based on the cat pack algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1, No.9 (121), pp. 41–48. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273786>.

216. Шишацький А. В., Зайцев М. М., Гаценко С. С. Аналіз характеру сучасних воєнних конфліктів Україна в умовах сучасних викликів та загроз: глобальний та національний виміри: матеріали наук.-практ. семінару (Київ, 17 лют. 2023 р.) / за ред. Г. П. Ситника, Л. М. Шипілової. Київ: На-вч.-наук. ін-т публ. упр. та держ. служби Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка, 2023. С.46–49.

217. Shyshatskyi, A. (Ed.) (2024). Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 180. doi: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7>.

218. Olexander Litvinenko, Svitlana Kashkevich, Andrii Shyshatskyi, Oksana Dmytriieva, Serhii Neronov, Ganna Plekhova. The method of self-organization of information networks in the conditions of destabilizing influences . Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph. 2024, Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 3–34. DOI: 10.15587/978-617-8360-04-7.CH1.

219. Svitlana Kashkevich, Andrii Shyshatskyi, Oksana Dmytriieva, Yevhen Zhyvylo, Ganna Plekhova, Serhii Neronov. The development of management methods based on bio-inspired algorithms. Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph. 2024, Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 35–69. DOI: 10.15587/978-617-8360-04-7.CH2.

220. Svitlana Kashkevich, Nina Kuchuk, Oleksii Kuvshynov, Ganna Plekhova, Oleksandr Yefymenko, Andrii Veretnov. The development of methods for evaluating the state of complex technical systems using artificial intelligence theory. Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph. 2024, Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 70–101. DOI: 10.15587/978-617-8360-04-7.CH3.

221. Svitlana Kashkevich, Heorhii Kuchuk, Ganna Plekhova, Viacheslav Davydov, Oleksandr Yefymenko, Yurii Beketov. The development of methods of learning artificial neural networks of intelligent decision-making support systems. Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph. 2024,

Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 102–136. DOI: 10.15587/978-617-8360-04-7.CH4.

222. Svitlana Kashkevich, Illia Dmytriiev, Inna Shevchenko, Oleksandr Lytvynenko, Lyubov Shabanova-Kushnarenko, Nataliia Apenko. Scientific-method apparatus for improving the efficiency of information processing using artificial intelligence. Information and control systems: modelling and optimizations: collective monograph. 2024, Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 137–167. DOI: 10.15587/978-617-8360-04-7.CH5.

223. Kashkevich, S. (Ed.) (2025). Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 202. doi: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9>.

224. Svitlana Kashkevich, Iraida Stanovska, Oleh Shknai, Oleksandr Lytvynenko, Yevhen Artamonov, Andrii Veretnov. Scientific method apparatus for intellectual assessment of the state of complex systems. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 3–32. DOI: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9.CH1>

225. Oleksandr Gaman, Svitlana Kashkevich, Oleh Shknai, Andrii Radchenko, Serhii Neronov, Zaur Musaiev. Methods of processing various data in intelligent systems for management of the network and server architecture of the internet of combat things. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 33–61. DOI: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9.CH2>.

226. Oleh Shknai, Oleg Sova, Olena Nechyporuk, Oleksii Nalapko, Oleksiy Buyalo, Anna Lyashenko. A set of methods for enhancing the efficiency of information processing in intelligent decision support systems. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 62–94. DOI: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9.CH3>.

227. Svitlana Kashkevich, Oleksandr Yaryzhko, Olena Nosyryeva, Anzhela Popova, Ihor Pimonov, Dmitry Leinyk. Intelligent methods for evaluating the state of hierarchical systems. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 160–189. DOI: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9.CH6>.

228. Svitlana Kashkevich, Olha Matsyi, Anastasiia Voznytsia, Oleksiy Buyalo, Daniil Krant, Kostiantin Radchenko. Scientific and methodological apparatus for processing diverse data in automated control systems. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp. 95–123. DOI: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9.CH4>.

229. Svitlana Kashkevich, Olena Shaposhnikova, Nataliia Saienko, Viktoriia Shevchenko, Nataliia Holeho, Taras Zalznyi. Intellectual methods for evaluating the state of UAV channels. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, pp.124–159. DOI: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9.CH5>.

230. A. Koshlan, O. Salnikova, M. Chekhovska, R. Zhyvotovskiy, Y. Prokopenko, T. Hurskyi, A. Yefymenko, Y. Kalashnikov, S. Petruk, A. Shyshatskyi. Development of an algorithm for complex processing of geospatial data in the special-purpose geoinformation system in conditions of diversity and uncertainty of data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. No. 9 (101). 2019. pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>.
231. Mahdi Q. A., Shyshatskyi A., Prokopenko Y., Ivakhnenko T., Kupriyenko D., Golian V., Lazuta R., Kravchenko S., Protas N. & Momit A.. Development of estimation and forecasting method in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, Vol. 3, No. 9(111), pp. 51–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232718>.
232. S. Anna, N. Kuchuk, A. Kovalenko, S. Kashkevich, S. Partyka and O. Yankovskyi, "The Method of Dynamic Routing in Self-Healing Networks," 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10877971.
233. Гороховатський В., Стяглик Н., Царевська, В. Комбінаційний метод прискореного метричного пошуку даних у задачах класифікації зображень. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 3, с. 5–12. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.01>.
234. Levashenko, V., Liashenko, O., Kuchuk, N. Побудова системи підтримки прийняття рішень на основі нечітких даних. *Сучасні інформаційні системи*, 2020, Том 4, № 4, с. 48–56. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.07>.
235. Meleshko, Y., Drieiev, O., Drieieva, H. Метод ідентифікації профілів ботів на основі нейронних мереж у рекомендаційних системах. *Сучасні інформаційні системи*, Том 4, № 2, с. 24–28. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.05>.
236. Kuchuk, N., Merlak, V., & Skorodelov, V. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Том 4, № 1, с. 97–102. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>.
237. Shyshatskyi, A., Tiurnikov, M., Suhak, S., Bondar, O., Melnyk, A., Bokhno, T., & Lyashenko, A.. Методика оцінки ефективності системи зв'язку оперативного угруповання військ. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Том 4, № 1, с. 107–112. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.16>.
238. Raskin, L., & Sira, O. (2016). Method of solving fuzzy problems of mathematical programming. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(4 (83), 23–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81292>
239. Lytvyn, V., Vysotska, V., Pukach, P., Brodyak, O., & Ugryn, D. Development of a method for determining the keywords in the slavic language texts based on the technology of web mining. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 2, No. 2 (86), pp. 14–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.98750>

240. Stepanenko, A., Oliinyk, A., Deineha, L., & Zaiko, T. (2018). Development of the method for decomposition of superpositions of unknown pulsed signals using the second-order adaptive spectral analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, Vol. 2, No.9 (92), pp. 48–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126578>.
241. Nechyporuk, O., Sova, O., Shyshatskyi, A., Kravchenko, S., Nalapko, O., Shknai, O., Klimovych, S., Kravchenko, O., Kovbasiuk, O., & Bychkov, A. (2023). Development of a method of complex analysis and multidimensional forecasting of the state of intelligence objects . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 2, No. 4 (122), pp. 31–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276168>.
242. Tarkhan, A. B., Zhuravskyi, Y., Shyshatskyi, A., Pluhina, T., Dudnyk, V., Kiris, I., Nalapko, O., Protas, N., Neronov, S., & Nechyporuk, V. (2023). Development of a solution search method using an improved fish school algorithm . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 4 (124), pp. 27–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284315>.
243. Koval, V., Shyshatskyi, A., Ransevych, R., Gura, V., Nalapko, O., Shypilova, L., Protas, N., Volkov, O., Stanovskyi, O., & Chaikovska, O. (2023). Development of a method for the search of solutions in the sphere of national security using bio-inspired algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, No. 4 (123), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280355>
244. Koval M., Sova O., Shyshatskyi A., Orlov O., Artabaiev Yu., Shknai O., Veretnov A., Koshlan O., Zhyvylo Ye., Zhyvylo I. Improvement of complex resource management of special-purpose communication systems. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2022, Vol 5, No 9 (119), pp.34–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266009.
245. Налапко О. Л. Analysis of technical characteristics of the network with possibility to self-organization / О. Л. Налапко, А. В. Шишацький. // Сучасні інформаційні системи. – Харків, 2018. – №4, Том 2. – С. 78–86.
246. Nina Kuchuk, Amin Salih Mohammed, Andrii Shyshatskyi and Oleksii Nalapko. The Method of Improving the Efficiency of Routes Selection in Networks of Connection with the Possibility of Self-Organization (Scopus). *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. – 2019. – №1.2., Volume 8. – С. 1–6. DOI: 10.30534/ijatcse/2019/0181.22019.
247. Analysis of mathematical apparatus for managing channel and network resources of military radio communication systems / О. Nalapko, R. Pikul, P. Zhuk, A. Shyshatskyi. // Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Наукове періодичне видання “Системи управління, навігації та зв'язку”, Збірник наукових праць. – Полтава, 2019. – №3(55). – С. 166–170.
248. О. Nalapko, А. Shyshatskyi, V. Ostapchuk, Qasim Abboud Mahdi, R. Zhyvotovskiy, S. Petruk, Ye. Lebel, S. Diachenko, V. Velychko, I. Poliak Development of a method of adaptive control of military radio network parameters. //

Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Volume 9 – 2021. – № 1(109).
– C. 18–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225331.

249. I. Alieinykov, K. A. Thamer, Y. Zhuravskiy, O. Sova, N. Smirnova, R. Zhyvotovskiy, S. Hatsenko, S. Petruk, R. Pikul, A. Shyshatskiy. Development of a method of fuzzy evaluation of information and analytical support of strategic management. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 6. No. 2 (102). 2019. pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184394>.

250. Shyshatskiy A. Method of multicriterial evaluation of the state of the special purposes of radio communication system channels / A. Shyshatskiy, O. Zhuk, R. Zhyvotovskiy, P. Zhuk // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. - 2017. - № 4. - С. 75-83. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2017_4_12.

251. Shyshatskiy, A., Sova, O., Zhuravskiy, Y., Zhyvotovskiy, R., Lyashenko, A., Cherniak, O., Zinchenko, K., Lazuta, R., Melnyk, A., & Simonenko, A. (2019). Development of resource distribution model of automated control system of special purpose in conditions of insufficiency of information on operational development. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 1, No 2(51), pp. 35–39. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.198082>.

252. Nalapko, O., Sova, O., Shyshatskiy, A., Protas, N., Kravchenko, S., Solomakha, A., Neroznak, Y., Gaman, O., Merkotan, D., & Miahkykh, H. (2021). Analysis of methods for increasing the efficiency of dynamic routing protocols in telecommunication networks with the possibility of self-organization. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 5, No. 2(61), pp. 44–48. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239096>.

253. Minochkin, A., Shyshatskiy, A., Hasan, V., Hasan, A., Opalak, A., Hlushko, A., Demchenko, O., Lyashenko, A., Havryliuk, O., & Ostapenko, S. (2021). The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 4, No.2(60), pp. 22–27. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235465>.

254. Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskiy, Dmytro Shevchenko, Bohdan Molodetskiy, Vitalii Stryhun, Yurii Yivzhenko, Yevhen Stepanenko, Nadiia Protas, & Oleksii Nalapko. (2022). Development of the method of increasing the efficiency of information transfer in the special purpose networks. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 3(4 (117)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259727>.

255. Sova, O., Zhuravskiy, Y., Vakulenko, Y., Shyshatskiy, A., Salnikova, O., & Nalapko, O. (2022). Development of methodological principles of routing in networks of special communication in conditions of fire storm and radio-electronic suppression. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 159-166. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002434>.

256. Oleg Sova, Hryhorii Radzivilov, Andrii Shyshatskyi, Pavel Shvets, Valentyna Tkachenko, Serhii Nevhad, Oleksandr Zhuk, Serhii Kravchenko, Bohdan Molodetskyi, & Hennadii Miahkykh. (2022). Development of a method to improve the reliability of assessing the condition of the monitoring object in special-purpose information systems. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 2(3 (116)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254122>.
257. Шишацький А.В., Сова О.Я., Журавський Ю.В., Троцько О.О. Методологічні засади інтелектуальної обробки даних в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. *Theoretical and scientific foundations in research in Engineering: collective monograph / Beresjuk O., Lemeschew M., Stadnijtschuk M., – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. 543 p. Available at :DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/>*
258. Романов О. М., Шишацький А. В., Налапко О. Л. Розробка методу підвищення оперативності передачі інформації в мережах спеціального призначення. *Modernn aspekty vědy: XXI. Dñl mezinñbrodnñ kolektivnñ monografie / Mezinñbrodnñ Ekonomickñ Institut s.r.o.. Āeskñ republika: Mezinñbrodnñ Ekonomickñ Institut s.r.o., 2022. С. 381-403.*
259. Шишацький А.В., Одарущенко О.Б., Кашкевич С.О., Пилипчук І.Ю., Мягих Г.Г. Обґрунтування методів інтелектуального аналізу даних для вирішення задачі прийняття рішень в умовах невизначеності впливу обстановки. *Theoretical and practical scientific achievements: research and results of their implementation: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the IV International Scientific and Theoretical Conference, April 7, 2023. Pisa, Italian Republic: European Scientific Platform. pp. 93-87. ISBN 979-8-88955-784-5, DOI 10.36074/scientia-07.04.2023.*
260. Sova, O., Zhuravskyi, Y., Zaitsev, M., Shyshatskyi, A., Andriishena, H. (2022). Development of an approach to the creation of an intellectual system of national security management. *ScienceRise*, No. 6, pp. 18–24. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002811>.
261. Shyshatskyi, A., Hurskyi, T., Vdovytskyi, Y., Vozniak, R., Nalapko, O., Andriishena, H., Shabanova-Kushnarenko, L., Protas, N., Vakulenko, Y., & Pyvovarchuk, S. (2023). Development of method for the identification of hybrid challenges and threats in the national security management system. *Technology Audit and Production Reserves*, No. 2(70), pp. 16–19. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.276544>.
262. Mohammed, B. A., Zhuk, O., Vozniak, R., Borysov, I., Petrozhalko, V., Davydov, I., Borysov, O., Yefymenko, O., Protas, N., & Kashkevich, S. Improvement of the solution search method based on the cuckoo algorithm . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023, Vol. 2, No. 4 (122), pp. 23–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277608>.

263. Mamoori, G. A., Sova, O., Zhuk, O., Repilo, I., Melnyk, B., Sus, S., Bondarchuk, M., Kashkevich, S., Moroz, M., & Klyuchak, O. The development of solution search method using improved jumping frog algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023, Vol. 4, No. 3 (124), pp. 45–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285292>.
264. Shyshatskyi, A., Romanov, O., Shknai, O., Babenko, V., Koshlan, O., Pluhina, T., Biletska, A., Stasiuk, T., & Kashkevich, S. Development of a solution search method using the improved emperor penguin algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023, Vol. 6, No. 4 (126), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291008>.
265. Tamer, K. A., Sova, O., Shaposhnikova, O., Yashchenok, V., Stanovska, I., Shostak, S., Rudenko, O., Petruk, S., Matsyi, O., & Kashkevich, S. Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024, Vol. 1, No. 4 (127), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205>.
266. Шишацький А. В., Жук О. В., Неронов С.М., Протас Н. М., Кашкевич С. О. “Сукупність методик підвищення оперативності прийняття рішень з використанням метаевристичних алгоритмів”. Монографія. C91 *Moderní aspekty vědy: XL. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2024. pp. 529 – 557. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/mono-40.pdf>.*
267. Шишацький А. В., Маций О. Б., Яценюк В. Ж., Троцько О. О. Кашкевич С. О. “Сукупність методик підвищення оперативності прийняття рішень з використанням комбінованих метаевристичних алгоритмів”. Монографія. C91 *Moderní aspekty vědy: XL. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2024. pp. 558 – 594. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/mono-40.pdf>.*
268. Шишацький А. В., Кашкевич С. О. “Аналіз форм та способів застосування безпілотних літальних апаратів”. XXII Міжнародна науково-практична конференція “Modern theories and improvement of world methods”, 06 – 09 червня 2023, Гельсінкі, Фінляндія. С. 516 – 520. URL: <https://isg-konf.com/uk/modern-theories-and-improvement-of-world-methods/>.
269. Кузьменко О. М., Стасюк Т. О., Кашкевич С. О. “Використання безпілотних літальних апаратів в сучасних телекомунікаційних мережах”. XVI Міжнародна науково-практична конференція “Methods of solving complex problems in science”, 25 – 28 квітня 2023, Прага, Чехія. С. 525 – 530. URL: <https://isg-konf.com/uk/methods-of-solving-complex-problems-in-science/>.
270. Апенько Н. В., Кашкевич С. О. “Побудова уніфікованих моделей представлення знань в експертних системах управління”. Міжнародна науково-практична конференція “Теоретико-практичні аспекти розвитку науки, освіти та

суспільства”, 28 квітня 2023, Україна, Рівне. С. 72 – 73. URL: <https://www.economics.in.ua/2023/04/28-2023.html>.

271. Нечипорук О. П., Кашкевич С. О., Голего Н. М. “Метод децентралізованого управління мережевими ресурсами інформаційно-комунікаційних мереж”. XIX Міжнародна науково-практична конференція “Innovative approaches to solving scientific problems”, 16 – 19 травня 2023, Токіо, Японія. С. 454 – 458. URL: <https://isg-konf.com/uk/innovative-approaches-to-solving-scientific-problems/>.

272. Нечипорук О. П., Кашкевич С. О., Юдіна Л. Г. “Аналіз технічних характеристик гібридних безпроводних мереж”. XXIV Міжнародна науково-практична конференція “Information and innovative technologies in education in modern conditions”, 20 – 23 червня 2023, Варна, Болгарія. С. 391 – 396. URL: <https://isg-konf.com/uk/information-and-innovative-technologies-in-education-in-modern-conditions/>.

273. Кучук Н. Г., Шишацький А. В., Нечипорук В. В., Шапошнікова О. П., Кашкевич С. О. “Розробка методу оцінки захищеності складних технічних систем з використанням штучних імунних систем”. XXVIII Міжнародна науково-практична конференція “Science and development of methods for solving modern problems”, 18 – 21 липня 2023, Мельбурн, Австралія. С. 202 – 209. URL: <https://isg-konf.com/uk/science-and-development-of-methods-for-solving-modern-problems/>.

274. Вітрук Ю. В., Тупота Є. В., Кашкевич С. О. “Аналіз методів багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах”. V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція “Integration of education, science and business in modern environment: summer debates”, 3 – 4 серпня 2023, Україна, Дніпро. С. 254 – 256. URL: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/08/Conference-Proceedings-3-4-August-2023.pdf>.

275. Кашкевич С. О. “Аналіз моделей дослідження складних технічних систем”. XXXIII Міжнародна науково-практична конференція “Modern scientific technologies and solutions of scientists to create the latest ideas”, 22 – 25 серпня 2023, Лондон, Велика Британія. С. 290 – 294. URL: <https://isg-konf.com/uk/modern-scientific-technologies-and-solutions-of-scientists-to-create-the-latest-ideas/>.

276. Шишацький А. В., Шкнай О. В., Налапко О. Л., Білецька А. В., Кашкевич С. О. “Аналіз підходів до впливу засобами радіоелектронного придушення на мережецентричну систему управління”. XXXIV Міжнародна науково-практична конференція “Science, latest trends, modern problems and improvement of theories”, 29 серпня – 01 вересня, 2023, С. 197 – 206. URL: <https://isg-konf.com/uk/science-latest-trends-modern-problems-and-improvement-of-theories/>.

277. Шишацький А. В., Кашкевич С. О., Тупота Є. В. “Аналіз математичних моделей маршрутизації в бездротових мережах спеціального призначення”. XXXV Міжнародна науково-практична конференція “Modern methods of solving scientific problems of reality”, 05 – 08 вересня 2023, Варна, Болгарія, С. 185 – 193.

URL: <https://isg-konf.com/uk/modern-methods-of-solving-scientific-problems-of-reality/>.

278. Кашкевич С. О., Возниця А. С. “The development of methods for finding solutions using the improved of locusts swarm algorithm”. VII Міжнародна науково-практична конференція “Global problems of improving scientific inventions”, 31 жовтня – 03 листопада, 2023, Копенгаген, Данія. С. 271 – 276. URL: <https://isg-konf.com/uk/global-problems-of-improving-scientific-inventions/>.

279. Шишацький А. В., Литвиненко О. І., Жук О. В., Артюх С. Г., Кашкевич С.О. “Розробка методики підвищення оперативності прийняття рішень в організаційно-технічних системах”. XIII Міжнародна науково-практична конференція “Development trends and improvement of old methods”, 12 – 15 грудня 2023, Варшава, Польща. С. 422 – 431. URL: <https://isg-konf.com/uk/development-trends-and-improvement-of-old-methods/>.

280. Шишацький А. В., Плющ Т. М., Кашкевич С. О. “Розробка методу оцінювання складних ієрархічних систем на основі удосконаленого алгоритму рою частинок”. XII Наукова конференція “Наукові підсумки 2023 року”. Збірник тез доповідей. – Харків, Х.: Технологічний центр, 2023. С. 64. URL: <https://entc.com.ua/uk/konferentsii/610-naukovi-pidsumky-roku>.

281. Шишацький А. В., Кашкевич С. О., Тупота Є. В. “Модель взаємодії відкритих систем для безпілотних авіаційних комплексів”. IV Міжнародна науково-практична конференція “Contemporary challenges of society and ways to overcome them”, 30 січня – 02 лютого 2024 р., Таллінн, Естонія. С. 280 – 288. URL: <https://isg-konf.com/uk/contemporary-challenges-of-society-and-ways-to-overcome-them/>.

282. Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Шкнай О. В., Троцько О. О., Шишацький А. В. Математична модель інформаційного конфлікту інформаційних мереж. XVII International Scientific and Practical Conference. April 30 – May 03, 2024, London, Great Britain. pp. 412–422. URL: <https://isg-konf.com/the-latest-technologies-in-the-development-of-science-business-and-education/>.

283. Снитюк В.Є., Сіпко О.М. (2022). Технологія еволюційного формування розкладів у закладах вищої освіти. Київ: Видавець ФОП Піча Ю.В., с.136 https://www.researchgate.net/publication/366759465_Tehnologia_evolucijnogo_for_muvanna_rozkladiv_u_zakladah_visoi_osviti

284. Olufemi Ayodeji, Odeniyi & Omidiora, Elijah & Olabiyisi, Stephen & Aluko, Aluko. (2015). Development of a Modified Simulated Annealing to School Timetabling Problem. International Journal of Applied Information Systems. 8. 16-24. 10.5120/ijais14-451277.

285. Chunlei, Tu & Liu, Yanjin & Zheng, Lixiao. (2021). Hybrid Element Heuristic Algorithm Optimizing Neural Network-Based Educational Courses. Wireless Communications and Mobile Computing. 2021. 1-12. 10.1155/2021/9581793.

286. Zhan, Shi-hua & Lin, Sannuo & Zhang, Ze-jun & Zhong, Yiwen. (2016). List-Based Simulated Annealing Algorithm for Traveling Salesman Problem. Computational Intelligence and Neuroscience. 2016. 1-12. 10.1155/2016/1712630.
287. Dandashi, Amal & Al-Mouhamed, Mayez. (2010). Graph Coloring for class scheduling. 1-4. 10.1109/AICCSA.2010.5586963.
288. Malviya, A., Agrawal, B., & Kumar, S. (2024). GRAPH COLORING ALGORITHM FOR COURSE TIME TABLE SCHEDULING PROBLEM. ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts, 5(3), 452–460. <https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v5.i3.2024.2182>
289. Vyas, Meghana. (2025). Exam Scheduling using Graph Coloring. Journal of Information Systems Engineering and Management. 10. 10-15. 10.52783/jisem.v10i24s.3868.
290. Muller T. Some Novel Approaches to Lecture Timetabling / T. Muller // In Proc. of the 4-th Workshop of Constraint Programming for Decision and Control “CPDC’2002”. – Gliwice. – 2002. – P. 352-369.
291. Kiyohara, Mitsuka & Ishihata, Masakazu. (2024). A Constraint Programming Approach to Fair High School Course Scheduling. 10.48550/arXiv.2408.12032.
292. Rudová, Hana & Müller, Tomáš & Murray, Keith. (2011). Complex university course timetabling. Journal of Scheduling. 14. 187-207. 10.1007/s10951-010-0171-3.
293. Lai, I. F., Wu, C.C., Hsueh, N.I., Huang, I.T., & Hwang, S.F. (2008). An artificial intelligence approach to course timetabling. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 17(01), 223–240. <https://doi.org/10.1142/s0218213008003868>
294. Гайтан, О.М. (2020). Автоматизація розкладу навчальних курсів університету. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 1 (2), 58–66. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/09>
295. Mazlan, Munirah & Makhtar, Mokhairi & Khairi, Ahmad & Mohamed, Mohamad A. (2019). University course timetabling model using ant colony optimization algorithm approach. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 13. 72-76. 10.11591/ijeecs.v13.i1.pp72-76.
296. Mahmud, Al-, Highly Constrained University Class Scheduling using Ant Colony Optimization (2021). International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT) Vol 13, No 1, February 2021, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3801441>
297. Herianto, T. (2021). Implementation of the Ant Colony System Algorithm in the Lecture Scheduling Process. Instal : Jurnal Komputer, 12(02), 50–56. <https://doi.org/10.54209/jurnalkomputer.v12i02.23>
298. Budhi, Gregorius & Gunadi, Kartika & Wibowo, Denny. (2015). Genetic Algorithm for Scheduling Courses. 51-63. 10.1007/978-3-662-46742-8_5.

299. Subang, Kim & Agoylo Jr, Jose. (2024). Optimizing Course Scheduling with Genetic Algorithms: A Dynamic Approach. SAR Journal - Science and Research. 296-302. 10.18421/SAR74-02.
300. Chen, Xiangliu & Yue, Xiao-Guang & Li, R.Y.M. & Zhumadillayeva, Ainur & Liu, Ruru. (2021). Design and Application of an Improved Genetic Algorithm to a Class Scheduling System. International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET). 16. 44. 10.3991/ijet.v16i01.18225.
301. Camungao, Ricardo. (2025). A New Class Scheduling Approach using Genetic Algorithm Methods for Isabela State University. Journal of Information Systems Engineering and Management. 10. 593-599. 10.52783/jisem.v10i49s.9909.
302. Isa Martinus, A., Budi Hartono, M., & Wicaksono, F. (2023). Implementation of the Constraint Satisfaction Problems Method in Genetic Algorithms for Course Scheduling Systems. Jurnal Improsci, 1(3), 140–147. <https://doi.org/10.62885/improsci.v1i3.149>
303. Білоус М.О. Захист інформації у web-застосунку для автоматизації розкладу занять у закладі освіти // Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених «Інформаційні технології – 2025», 15.05.25, КСУ імені Бориса Грінченка, Київ, Україна, 362 с. ISSN: 2664-2638.
304. Alvarez-Andrade S. Strong approximation of doubly stochastic Poisson processes .C. R. Acad. Sci. Paris Ser. I. Math. – 1993. – № 8. – P. 869-872.
305. Anisimov V.V., Anisimov V. Switching Processes in Queueing Models. – ISTE Ltd, 2008. – 343 p.
306. Asmussen S., Thorisson H. A Markov chain approach to periodic queues. J. Appl. Probab. – 1987. – № 24. – P. 215-225.
307. Bambos N., Walrand J. On queues with periodic inputs. J. Appl. Probab. – 1989. – № 26(2). – P. 381-389.
308. Baskett F., Chandy K.M. , Müntz R.R. , Palacios F.G. Open, closed, and mixed networks of queues with different classes of customers. J. of ACM. – 1975. – v. 22: № 2. – P. 248-260.
309. Berman Simeon M. Extreme sojourns of diffusion processes. Ann. Probab. – 1988. – v. 16: № 1. – P. 361-374.
310. Breuer L. The Periodic BMAP/PH/c Queue. Queueing Syst. – 2001. – № 38(1). – P. 67-76.
311. Breuer L. Two examples for computationally tractable periodic Queues. I. J. of Simulation. – 2004. – Vol.3: № 3-4. – P. 15-24.
312. Clark A.B. A waiting line process of Markov type. Ann. Math. Statistics. – 1956. – Vol. 27, №2. – P. 452-459.

313. Dvurecenskij A. Kyljukina L.A. , Ososkov G.A. On a problem of the busy-period determination in queues with infinitely many servers. J. Appl. Probab. – 1984. – № 21. – P. 201-206.
314. Eenige M.J.A. Queueing Systems with Periodic Service / M.J.A. van Eenige. – Eindhoven, The Netherlands, 1996. – 162 p.
315. Erlang A.K. Solution of some problems in the theory of probabilities of significance in automatic telephone exchanges. The Post Office Electrical Engineers Journal. – 1917-18. – Vol. 10. – P. 189-197.
316. Falin G. Periodic queues in heavy traffic. Adv. Appl. Probab. – 1989. – № 21(2). – P. 485-487.
317. Giorno V., Nobile A.G. , Ricciardi L.M. On some time-non-homogeneous diffusion approximation to queueing systems. Adv. Appl. Probab. – 1987. – Vol. 17, №4. – P. 974-994.
318. Gordon W.J., Newell G.F. Closed Queueing Systems with Exponential Servers. Oper. Res. – 1967. – Vol. 15, № 2. – P. 254-265.
319. Granovsky B.L. Zeifman A.I. Quasi-ergodic Nonstationary Queues. Information processes. – 2002. – T. 2, № 2. – ст. 182-185.
320. Harlamov B.P. On statistics of continuous Markov processes: semi-Markov approach. Probability theory and math. statistics. – 1990. – Vol. 1. – P. 504-511.
321. Harrison J.M., Lemoine A.J. Limit theorems for periodic queues. J. Appl. Prob. – 1977. – № 14. – P. 566-576.
322. Hasofer A. On the single-server queue with nonhomogeneous and general service time. J. Appl. Probab. – 1964. – Vol. 1. – P. 369-384.
323. Heyman D.P. On Ross's conjectures about queues with nonstationary Poisson arrivals. J. Appl. Prob. – 1982. – Vol. 19. – P. 245-249.
324. Jackson J.R. Networks of Waiting Lines. Oper. Res. – 1957. – Vol. 5, № 4. – P. 518-521.
325. Keller J.B. Time-dependent queues. SIAM Review. – 1982. – Vol. 24, № 4. – P. 401-412.
326. Kelly F.P. Modelling communication networks, present and future. Proc. R. Soc. – 1995. – bond. A, Vol. 444. – P. 1-20.
327. Kelly F.P., Williams R.J. Stochastic Networks. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications. – 1995. – Vol. 71, Springer-Verlag, New York. – P. 169-186.
328. Konakov V.D. Local limit theorem on convergence of Markov chain to diffusion processes. Front. Pure and Appl. Probab.: Proc 3. Finn.-Sov. Symp. Probab. Theory and Math. Statist. – 1993. – P. 112-134.

329. Lemoine A.J. Waiting time and workload in queues with periodic Poisson input / Austin J. Lemoine // J. Appl. Probab. – 1989. – Vol. 26, № 2. – P. 390-397.
330. Massey W.A., Whitt W. A stochastic model to capture and time dynamics in wireless communication systems. Probab. Engin. and Inform. Sci. – 1994. – Vol. 8. – P. 541-569.
331. Massey W.A., Whitt W. Networks of infinite-server queues with nonstationary Poisson input. Queuing Systems. Probab. Engin. and Inform. Sci. – 1993. – Vol. 13. – P. 183-250.
332. Matis J., Wehrly T.E. Generalized stochastic compartmental models with Erlang transit times. J. Pharmac. Biopharm. – 1990. – Vol. 18. – P. 589-607.
333. Neuts Marcel E. An explicit solution to a particular Markov chain of M/G/1 type J. Appl. Probab. – 1994. – Vol. 31A. – P. 337-342.
334. Ковальчук Ю.О., Войтік А.В., Пушка О.С. Стан, оцінка ефективності та перспективи застосування на виробництві методу лазерного зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин в Україні. Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2012. № 35. С. 242–248.
335. Бобрицький В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. Київ, 2007. 20 с.
336. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки: навч. посібник. Київ: Кондор, 2008. 166 с.
337. Мажейка О.Й. Модифікування технології лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2008. Вип. 21. С. 164–167.
338. Ковальчук Ю.О., Дідур В.В., Кравченко В.В. Застосування лазерного зміцнення сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація». 2012. Вип. 25, Ч.1. С. 74–80.
339. Ковальчук Ю.О. Огляд використання лазерного зміцнення сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки. Вісник аграрної науки Причорномор'я. 2012. Вип. 2 (66). С. 172–181.
340. Ковальчук Ю.О., Дідур В.В., Невзоров А.В. Глибина та мікротвердість зміцненого лазером шару сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Науковий вісник Національного університету

біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 226. С. 295–301.

341. Пашкова Г.І. Підвищення працездатності чавунних колінчастих валів потужних транспортних дизелів комбінованими методами зміцнення: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. Харків, 2008. 24 с.

342. Ковальчук Ю.О., Невзоров А.В., Кравченко В.В. Застосування лазерної обробки сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. 2015. Вип. 3. С. 171–176.

343. Ковальчук Ю.О. Лазерне зміцнення робочих органів ґрунтообробних знарядь зі сталі 65Г. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 254. С. 174–182.

344. Ковальчук Ю.О., Невзоров А.В., Дідур В.В. Лазерне зміцнення деталей сільськогосподарських машин зі сталі 45. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. 2016. Вип. 4. С. 107–114.

345. Завойко О.С. Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механіко-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос. Фізика і хімія твердого тіла. 2014. Т. 15. № 4. С. 846–855.

346. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В. Аналіз залишкових напружень в результаті лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки із залізовуглецевих сплавів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Т. 30 (69), № 1, ч.1. С. 1–5.

347. Ковальчук Ю.О., Оляднічук Р.В., Ковальчук А.О. Дослідження впливу лазерного зміцнення на поверхневі залишкові напруження сталі 45. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Т. 30 (69), № 2, ч.1. С. 13–17.

348. Ковальчук Ю.О., Кравченко В.В., Оляднічук Р.В. Лазерна обробка деталей сільськогосподарської техніки з чавуну. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. 2017. Вип. 5. С. 92–99.

349. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О., Шевчук В.В. Особливості лазерного зміцнення деталей сільськогосподарської техніки з чавуну. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 262. С. 238–245.

350. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О. Особливості застосування поверхневої лазерної обробки деталей сільськогосподарських машин з чавуну. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. 2017. Вип. 47, ч.2. С. 105–111.

351. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О. Дослідження структури та мікротвердості обробленої лазером поверхні чавунів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. 2018. Вип. 48. С. 54–61.
352. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В., Ковальчук А.О., Садовий К.В. Застосування лазерно-плазмового методу зміцнення деталей двигунів внутрішнього згоряння із чавуну. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2020. Т. 31 (70), № 2, ч.1. С. 7–12. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/02>
353. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В. Вплив поглинаючих покриттів на глибину лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки зі сталі 45. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація». 2017. Вип. 30. С. 16–21.
354. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В. Застосування легуючих матеріалів та поглинаючих покриттів при лазерному зміцненні деталей автомобільного транспорту. Сільськогосподарські машини. 2023. Вип. 49. С. 99–104. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1026>
355. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О. Застосування лазерного зміцнення деталей автомобільного транспорту в АПК. Сільськогосподарські машини. 2021. Вип. 46. С. 49–57. <https://doi.org/10.36910/acm.vi46.520>
356. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О. Лазерно-плазмове зміцнення попередньо термооброблених деталей автомобільного транспорту в АПК. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. 2021. Вип. 51. С. 54–60. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.54-60>
357. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В., Ковальчук А.О. Підвищення зносостійкості деталей автомобільного транспорту в АПК шляхом застосування лазерного наплавлення. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2022. № 1 (116). С. 25–31. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-1-3>
358. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О., Кравченко В.В., Ковальчук А.О. Лазерне зміцнення інструментів та деталей обладнання ремонтних майстерень автомобільного транспорту в АПК. Центральнотехнічний науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 9 (40), ч. I. С. 104–110. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.104-110](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.104-110)
359. Kovalchuk Y., Voitik A., Kovalchuk A. Research on laser hardening of automotive parts in the agricultural industry. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2024. № 3 (126). С. 58–64. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-3-6>
360. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О. Лазерне зміцнення деталей автомобільного транспорту в АПК. Конструювання, виробництво та експлуатація

сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 54. С. 136–141. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.136-141>

361. Скобло Т.С. та інш. Виробництво та застосування прокатних валків: Довідник: за ред. проф. Скобло Т.С. - Х.: ЦД № 1, 2013 – 572 с.

362. Деякі аспекти експлуатації валків на стані гарячої прокатки /В.Н.Скороходов, П.П.Чернов, В.А.Третьяков [та інш.] //Сталь.–2001.–№ 8.–С.8-13.

363. Ключко О.Ю. Характеристика, умови експлуатації та вимоги до матеріалу прокатних валків із високохромистого чавуну// Технічний сервіс АПК, техніка та технологія у сільськогосподарському машинобудуванні: Вісник ХНТУСГ, вип.77 – Харків. - 2009. – С.433-440

364. New technical comment on Hitachi high chromium roll for hot strip mill// Проспект фірми “Хитачи киндзоку” Нисимен, Японія. Hitachi Kinzoku Ltd., <http://www.hitachi-metals.co.jp/e/>.

365. T.S. Skoblo, O.Y. Klochko, E.L. Belkin, V.N. Romanchenko. Features of the carbide phase degradation under heating and deformation. Lett. Mater., 2021, 11(1), 22-27. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-1-22-27>

366. Тихонович В.І. Управління зносостійкістю хромистих сталей та чавунів шляхом створення оптимальної гетерогенної структури// Процеси лиття. – 1994. - №1.-С.104-108.

367. Матеріали фірми "Bofors Akers", <http://www.akersrolls.com>.

368. Балаклеєць І.А., Філіппов В.С., Сирота А.А. та ін. Досвід освоєння виробництва відцентроволитих валків на ЛГНПВК. «Ливарне виробництво», 2007, № 6.-С.15-17.

369. Матеріали компанії Marichal Ketin, <http://www.mkb.be>.

370. Синнаєве М. Вимоги до сучасних перспективних марок двошарових прокатних валків. Матеріали компанії «Гонтерманн Пайперс». <http://www.gontermann-peipers.de>.

371. Матеріали компанії Usinor SA, <http://www.usinor.com>.

372. Матеріали компанії Climax Molybdenum, <http://www.climaxmolybdenum.com>.

373. Складові валки з хромистого чавуну як робочі валки для чистових клітей широкосмугових станів гарячої прокатки. Матеріали фірми Karl Buch Walzengiesserei GmbH & Co., <http://www.steelemotion.com>.

374. Skoblo, T.S., Klochko, O.Y., Sidashenko, A.I. et al. Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers. Steel Transl. 43, 603–606 (2013). <https://doi.org/10.3103/S096709121309012X>

375. T.S. Skoblo, O.Y. Klochko, E.L. Belkin, V.N. Romanchenko. Features of the carbide phase degradation under heating and deformation. Lett. Mater., 2021, 11(1), 22-27. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-1-22-27>
376. Будова чавуну./ Бунін К.П., Таран Ю.Н. -М.: Металлургия, 1972.-160с.
377. Donald H. Buckley EFFECT OF CARBON CONTENT ON FRICTION AND WEAR OF CAST IRONS. NASA TP-1052, 1977
378. Ципін І.І. та інш. Вплив орієнтації карбідів Me_7C_3 на зносостійкість білого чавуну 300X20ДНФ. Металловед. и терм. обраб. мет. – 1991.-№10.-С.26-28.
379. Мазур А.В. та інш. Евтектична кристалізація в білих чавунах за участю метастабільних карбідів. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004.-№2.-С.9-12.
380. Бокштейн С.З. Будова і властивості металічних сплавів - М.: Металлургия, 1971.-495с.
381. Дослідження кристалічної структури карбідів типу Me_7C_3 / Нестеренко А.М., Куцова В.З., Ковзель М.А. // Металлофізика и новейшие технологии. – 2003. - №1.- С. 99-106.
382. Андрейко І.М. Вплив мікроструктури на міцність і циклічну тріщиностійкість чавунів// Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002.-№5.-С.48-56.
383. Куцова В.З., Швець О.В., Куцов А.Ю., Ковзель М.А. Закономірності структуроутворення та кінетики фазових перетворень в чавуні ИЧХ16НМФТ/ Куцова В.З., Швець О.В. [и др.] //Металознавство та обробка металів.-2002. - №1-2.-С.10-17.
384. Ключко О.Ю. Статистична оцінка впливу хімічного складу на механічні властивості високохромистих чавунних прокатних валків./ Скобло Т.С., Ключко О.Ю. //Технічний сервіс АПК, техніка та технологія у сільськогосподарському машинобудуванні: Вісник ХНТУСГ, вип.118. – Харків. - 2011. – С.85-90.
385. Бобро Ю.Г. Леговані чавуни. - М.: Металлургия, 1976.-288с.
386. Schissler J.-M. Relation entre la resistance a l'usure et la structure de fontes blanches riches en chrome (20%)/ Schissler J.-M., Saverna J., Dupin P., Mathia T. //Strength Metals and Alloys (ICSMA7): Proc.7th Int. Conf., Montreal.-Vol.2.-Oxford e.a.-1986.-P.1583-1588.
387. Klochko, O., Volchuk, V., Bilinska, M., Deryabkina, E., Voronov, O. (2025). Structure Formation Features of White Chrome Cast Irons Inside Working Layer of Massive Mill Rolls. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham., pp 186–196. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82979-6_19.
388. Оцінка термічних напружень в масивних виливках прокатних валків /Скобло Т.С., Власовец В.М., Ключко О.Ю. та інш. //Технологічні системи ремонтного виробництва: Вісник ХНТУСГ, вип.96–Харків.-2010. – С.36-45.

389. Теплофізичні властивості промислових матеріалів: Довідник /К.Д. Ільченко, В.А. Чеченев, В.П. Іващенко та ін. – Дніпропетровськ: Січ, 1999. – 152 с.
390. Пружні константи та модулі пружності металів і неметалів: Довідник. / Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.И.– Київ: Наукова думка, 1982. – 288с.