

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Одеська політехніка»

# ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ

- Електромашинні і напівпровідникові перетворювачі
- Комп'ютерні системи, мережі та їх компоненти
- Системи штучного інтелекту
- Автоматизація процесів управління
- Моделювання динамічних систем
- Енергозбереження засобами сучасної електротехніки

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ  
ЗАСНОВАНО В 1965 РОЦІ

№ 42 (118)

Одеса  
2025

**Видавник – Національний університет «Одеська політехніка»**

У журналі друкуються результати наукових досліджень, які стосуються розробки сучасних автоматизованих електромеханічних систем, проектування електромеханічних перетворювачів та електричних апаратів, мехатроніки, комп'ютерних систем та їх компонентів, інформаційних інтелектуальних систем, комп'ютерних мереж, моделювання динамічних систем, а також захисту інформації в комп'ютерних системах.

Журнал розраховано на інженерів та наукових працівників, які займаються дослідженням, проектуванням та експлуатацією електротехнічних та комп'ютерних систем та їх компонентів, а також на викладачів і студентів вищих та середніх учбових закладів відповідних спеціальностей.

**Друкується за рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» від 26.02.2025, протокол № 7**

**Головний редактор**

**Водічев В. А.** (Національний університет «Одеська політехніка»)

**Заступники головного редактора:**

**Шапорин Р. О., Войтенко В. А.** (Національний університет «Одеська політехніка»)

**Редакційна колегія**

Проф., д.т.н. **Атаманюк Ігор**, Миколаївський національний аграрний університет, Україна

Проф., к.т.н. **Бардіс Ніколаос**, Грецька військова академія, Афіни, Греція

Проф., д.т.н. **Масвський Дмитро**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Востров Георгій**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Ву Вай Лок**, Нортумбрийський університет, Велика Британія

Проф., к.т.н. **Зайцева Олена**, Університет Жиліна, Словаччина

Доц., к.т.н. **Кисилевська Альона**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Маляр Василь**, Львівський політехнічний національний університет, Україна

Проф., д.т.н. **Оборський Геннадій**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Орловський Аркадіус**, Варшавський університет природничих наук, Польща

Проф., к.т.н. **Пересада Сергій**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна

Проф., д.т.н. **Петрушин Віктор**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Прокопович Ігор**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., к.т.н. **Рафайловський Горан**, Університет прикладних наук Берліну, Німеччина

Проф., д.т.н. **Романський Раді**, Технічний Університет Софії, Болгарія

Проф., д.т.н. **Саченко Анатолій**, Тернопільський національний економічний університет

Проф., д.т.н. **Ситніков Валерій**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., к.т.н. **Філіпс Кріс**, Університет Ньюкасла, Великобританія

Проф., д.т.н. **Харченко В'ячеслав**, Національний аерокосмічний університет імені Н.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна

**Виконавчий редактор** Калінін О.Г. (Нац. ун-т «Одеська політехніка»)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (Категорія "Б"), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук та доктора філософії (Наказ МОН України від 26.11.2020, № 1471) за спеціальностями: 113 - Прикладна математика, 122 - Комп'ютерні науки та інформаційні технології, 123 - Комп'ютерна інженерія, 124 - Системний аналіз, 125 – Кібербезпека, 126 - Інформаційні системи та технології, 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 174 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Статті журналу індексуються в міжнародних базах даних: Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, Google Scholar, Research Bib, а також в Національній бібліотеці України імені В. И. Вернадського.

Приймаються рукописи, підготовлені українською або англійською мовою. Рукописи статей проходять подвійне сліпе рецензування. Періодичність виходу журналу – три рази на рік.

Адреса редакційної колегії: Україна, 65044, м. Одеса, пр. Шевченка,1, Національний університет «Одеська політехніка».

**Тел.:** +38(048) 703-84-54, +38(050) 234-77-22

**E-mail:** [eltecs@op.edu.ua](mailto:eltecs@op.edu.ua)

**Сайт** <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal>

**ISSN 2221-3937 (Print)**

**ISSN 2221-3805 (on Line)**

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Odesa Polytechnic National University

# ELECTROTECHNIC AND COMPUTER SYSTEMS

- **Electromechanical and semiconductor converters**
- **Computer Systems, Networks and Their Components**
- **Artificial intelligence Systems**
- **Automation of control processes**
- **Dynamic Systems Modeling**
- **Energy saving by means of modern electrical engineering**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL  
FOUNDED IN 1965

No. 42 (118)

Odesa  
2025

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.42.118.2025>

UDC 004.231.2

**Publisher – Odesa Polytechnic National University**

The journal publishes the results of scientific research concerning the development of modern automated electro-mechanical systems, the design of electromechanical converters and electrical apparatus, mechatronics, computer systems and their components, information intelligence systems, computer networks, modeling of dynamic systems, as well as information security in computer systems. The journal reflects mathematic modeling and optimization of electrotechnical and electromechanics systems, ways of electric drives control allowing to saving energy, modern systems of power supply. Besides that, the materials about automatic control systems and systems of artificial intelligence are published in the journal.

The journal is designed for engineers and scientists that take part in researches, designing and exploitation of electrotechnical and computer systems and their components, and also for corresponding specialty teachers and students of high school.

**The journal is printed according to the decision of the scientific council of Odesa Polytechnic National University from 26.02.2025, No. 7**

**Editor-in-chief**

**Vodichev V. A.** (Odesa Polytechnic National University)

**Deputy Editor-in-chief**

**Voytenko V. A., Shaporin R. O.** (Odesa Polytechnic National University)

***Editorial Board***

Prof., DrS **Atamanyuk Igor**, Mykolayiv National Agrarian University, Ukraine

Prof., Dr **Bardis Nikolaos**, Hellenic Military Academy, Athens, Greece

Prof., DrS **Kharchenko Vyacheslav**, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky “Kharkiv Aviation Institute”, Ukraine

PhD **Kysylevska Alona**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Malyar Vasyl**, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Oborskyi Hennadii**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Orlowski Arkadiusz**, Warsaw University of Life Sciences, Poland

Prof., DrS **Peresada Sergei**, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine

Prof., DrS **Petrushyn Viktor**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., Dr **Phillips Chris**, Newcastle University, United Kingdom

Prof., DrS **Prokopovych Ihor**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., PhD **Rafajlovski Goran**, University of applied science Berlin, Germany

Prof., DrS **Romansky Radi**, Technical University of Sofia, Bulgaria

Prof., DrS **Sachenko Anatoly**, Ternopil National Economic University

Prof., DrS **Sytnikov Valeriy**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Maevsky Ddmitro**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Vostrov Georgy**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Woo Wai Lok**, Northumbria University, United Kingdom

Prof., Dr **Zaitseva Elena**, Zilina University, Slovakia

***Executive editor Kalinin O. G.*** (Odesa Polytechnic National University)

The Journal is included in the list of specialized scientific publications, which can be published results of theses for the degree of doctor and candidate of technical sciences (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated November 26, 2020, No. 1471).

Journal articles are indexed in international databases: Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, Google Scholar, Research Bib, and in National Library of Ukraine named after Vernadsky.

Manuscripts can be prepared in Ukrainian or English. Manuscripts are double-blind reviewing. Frequency of the magazine issue is three times a year.

Editorial board address: Odesa Polytechnic National University, Shevchenko Avenue, 1, Odessa, 65044, Ukraine

**Phone:** +38(048) 703-84-54, +38(050) 234-77-22

**E-mail:** [eltecs@op.edu.ua](mailto:eltecs@op.edu.ua)

**Web-site:** <http://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal>

**ISSN 2221-3937 (Print)**

**ISSN 2221-3805 (on Line)**

## ЗМІСТ

## CONTENTS

	Стор.		Page
<b>О. В. Стрельцов, Ю. В. Орновецький, М. О. Катріченко, В. Г. Поздняков, С. С. Коновалов</b> Система управління роботом-маніпуля- тором на основі ROS.....	6	<b>O. Streltsov, Y. Ornovetskyi, M. Katrichenko, V. Pozdnyakov, S. Konovalov</b> ROS-based manipulator robot control system .....	6
<b>Л. Я. Белікова, А. М. Якімець, С. В. Пернак</b> Оптимізація обмоткових даних двошвид- кісного конденсаторного двигуна.....	14	<b>L. Ya. Belikova, A. M. Yakimets, S. V. Pernak</b> Optimization of winding data of a two-speed capacitor motor .....	14
<b>Р. В. Ковалевич, Д. Д. Курінько, В. І. Кривда</b> Оцінка пози людини в інтелектуальних системах відеоспостереження: сучасні підходи та виклики.....	22	<b>R. Kovalevych, D. Kurinko, V. Kryvda</b> Human posture estimation in intelligent video surveillance systems: modern ap- proaches and challenges.....	22
<b>К. В. Беглов, В. І. Кривда, О. А. Климчук, В. Р. Жуковський, О. В. Яворський, Г. Й. Галантер</b> Порівняння математичних моделей енер- гогенеруючого обладнання при моделю- ванні перехідних процесів в енергосисте- мах.....	32	<b>K. V. Beglov, V. I. Kryvda, O. A. Klymchuk, V. R. Zhukovskiy, O. V. Yavorsky, G. Io. Galanter</b> Comparison of mathematical models of power generation equipment in transient process simulation in energy systems .....	32
<b>Т. Д. Марколенко, Д. Г. Проданов, Я. І. Беглов</b> Управління тепловим навантаженням котла при спалюванні твердих побутових відходів.....	43	<b>T. Markolenko, D. Prodanov, Y. Beglov</b> Boiler thermal load control during the combustion of solid household waste .....	43
<b>К. Г. Кіркопуло, В. М. Тонконогий, М. М. Максимов</b> Вдосконалення автоматизації управління термічним знищенням твердих побутових відходів через відновлення програмного забезпечення після боїв.....	52	<b>K. Kirkopulo1, V. Tonkonogiy1, M. Maksymov</b> Improvement of automation in managing thermal destruction of municipal solid waste through software recovery from failures .....	52
<b>М. В. Грішин, О. С. Тарахтій, Г. Й. Галантер</b> Комп'ютерно-інтегрована система управління зносостійкістю поверхонь теплообмінних труб твердопаливних котлоагрегатів з розподілом потоків вугілля між керуючими впливами.....	59	<b>M. V. Grishyn, O. S. Tarakhtiy, G. Io. Halanter</b> Computer-integrated system for controlling the wear resistance of heat exchange tubes of solid fuel boilers with the distribution of coal flows between control influences .....	59
<b>О. М. Бесараб, В. Я. Деревенко, С. В. Горковський</b> Оцінка можливостей заряджання вантаж- них електричних автомобілів від фото- електричних панелей.....	71	<b>O. Besarab, V. Derevenko, S. Horkovskiy</b> Assessment of the possibilities of charging electric trucks from photoelectric panels .....	71

## ROS-based manipulator robot control system

O. Streltsov, Y. Ornovetskyi, M. Katrichenko, V. Pozdnyakov, S. Konovalov

*Odessa Polytechnic National University*

**Abstract.** *In order to realize the control of the robot manipulator, the control system of the robot manipulator was studied. On the premise of ensuring the robustness and real-time of the system, it is proposed to build a control system based on Ubuntu system combined with Robot Operating System (ROS), and use Controller Area Network (CAN) communication to build a robot manipulator. Finally, through the simulation experiment and the physical robot control experiment, the application effect of the robot manipulator control system is verified. The experimental results show that the robot manipulator control system has the basic working ability to control the coordinated robot for path planning, and can well establish the communication between the upper and lower machines and control the robot manipulator. At the same time, the control system has the characteristics of modularity, high portability, clear frame, and low delay.*

**Keywords:** *robot manipulator, ROS system, control system design, algorithm RRT, communication interface.*

### Introduction

The growing popularity of robotics and the increasing demands for precision in robotic operations have driven the development of new hardware and software solutions for control systems. The proliferation of diverse robot types has led to the emergence of a wide range of control systems, each tailored to specific robot categories.

Despite the active efforts of numerous companies engaged in research and development within the robotics field, existing control systems are predominantly designed for individual robot types and lack universality, which limits their applicability in the broader market. This limitation hinders the advancement of universal control systems that could meet market demands. Consequently, the development of a universal control system capable of supporting the majority of modern robots has become an urgent market need.

In the development of control systems for modern robots, several development platforms can be considered, including Microsoft Visual, Matlab, MRDS, among others. Microsoft Visual [1] is well-suited for development within the Windows environment and offers a comprehensive set of tools, though the development process can be complex and prone to errors. Matlab [2] is primarily used for simulation experiments, but it presents challenges when implementing control for physical robots.

Since these software platforms encapsulate certain algorithms, such as OpenCV, OMPL, and others, it is essential to identify a development platform that is compatible with various algorithms and is easy to use across multiple platforms.

To achieve this, a control system platform was developed based on the Robot Operating System (ROS) [3], and corresponding experiments were conducted for both simulation and physical control.

### 1. Configuring the ROS Environment

The Robot Operating System (ROS) is a framework for developing robotic control systems. It includes features such as 3D reconstruction, dynamic modeling, real-time environment simulation, physical control, and other functionalities that enhance the development requirements for robots [4]. ROS is available for all major operating systems, with Ubuntu being one of the most advanced in terms of ROS support. ROS does not handle system process management; instead, it provides various functional packages and establishes communication between them through a peer-to-peer mode to create a control platform for robot simulation and physical control. This framework introduces key concepts such as "node," "topic," "service," and "message." As illustrated in Fig. 1, these core concepts are used to deliver data to the control system through their interactions.

#### 1.1 . Node

Nodes in ROS represent individual processes that interact with each other through topics and services,

contributing to the system's efficiency and maintainability. Each node is assigned a unique name within the system, preventing name duplication and ensuring the uniqueness of interactions between nodes.

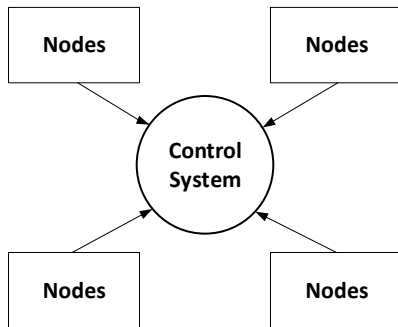


Fig. 1. ROS management structure

### 1.2 .Topic

A topic in ROS serves as the primary bus for data exchange between nodes. The publisher, who sends the data, and the subscriber, who receives it, do not need to be aware of each other's existence.

A topic can support multiple subscribers and multiple publishers; however, to avoid errors, different nodes must publish data under the same topics.

### 1.3 . Service

Services in ROS are used for direct interaction with nodes and for obtaining feedback from them. Each service consists of two messages: one that makes a request and another that processes and responds to it. Services are user-defined, stored in the `srv` directory, and are converted into source code during compilation.

### 1.4 . Message

Messages in ROS are used to transmit data between nodes by publishing them in predefined topics. All data in ROS can be represented as messages, which have a fixed type and structure, defined as the package name/.msg file name. The management of all processes in ROS can be implemented using nodes, topics, services, and messages.

## 2. Research methods and progress

### 2.1. The control system algorithm

Controlling robotic manipulators requires high-precision control over joints to ensure smooth motion, which in turn necessitates the use of specialized control algorithms. In this study, the primary algorithm used is robot trajectory planning. The system is designed based on the input of initial

and final positions to guide the robot's movement. Given these characteristics, the control system is built upon the Rapidly-exploring Random Tree (RRT) algorithm [5].

The RRT algorithm is specifically developed for real-time trajectory planning of non-linear mechanical systems. Unlike other well-known sampling methods, whose effectiveness largely depends on numerous tunable parameters, RRT demonstrates versatility and is the most suitable approach for solving a wide range of motion planning problems.

RRT employs a discrete representation of the configuration space in the form of a tree, where the root node corresponds to the object's initial position. This tree expands in such a way that it gradually covers the entire permissible configuration space, thereby increasing the accuracy of the constructed path network.

At the core of the RRT algorithm is a random tree used to detect collisions of sample points in the motion space by randomly growing branches from the root node toward the target. This algorithm does not require 3D modeling but effectively solves path planning tasks in a three-dimensional space with multiple constraints. Due to its high efficiency, accuracy, and simplicity, RRT is well-suited for controlling the motion of robots with a large number of degrees of freedom.

The RRT algorithm takes the initial position as the root node and generates child nodes through random sampling, resulting in a tree that grows randomly. When this tree reaches the target node, a path from the root to the target node is constructed, thereby facilitating the robot's trajectory planning. The following algorithm outlines the process of robot trajectory planning using the RRT method:

*Function RRTPlan: BOOL( env :environment, T :RRTTree, S goal: node )*

1. *Var S target, S nearest, S new, node*  
# Initialization of variables: Variables *S target*, *S nearest* i *S new* which represent the nodes of the RRT tree, are declared, які представляють вузли дерева *RRT*.
2. *While(search time/space remaining) do*  
# Search cycle: Within the search time or space, the main cycle of the algorithm is performed.
3. *S target = ChooseTarget ( S goal)*  
# Select target: The *ChooseTarget* function selects a target node *S target*, which can be a random point or a final target *S goal*.
4. *S nearest = Nearest ( T, S target)*  
# Searching for the nearest node: The closest node of the tree *T* to the target node *S target* is found using the *Nearest* function.

5. IF ( $Distance(S_{nearest}, S_{goal}) < Distance_{Threshold}$ )

6. Return true

# Distance to target check: If the distance between the nearest node and the target node is less than a given threshold value, true is returned, indicating successful trajectory planning.

7.  $S_{new} = Extend(S_{nearest}, S_{target})$

8. IF ( $S_{new} \neq NULL$ ) then

9.  $T.AddNODE(S_{new})$

10. Return false

# Extending the tree: If the condition of steps 5.6 is not met, the tree is extended towards the target node using the *Extend* function. If a new node  $S_{new}$  is created, it is added to tree  $T$ . If no new node is created, false is returned, indicating that no path was found.

11. Var  $p$  : real

12.  $p = Random(0, 1.0)$

13. IF  $o < p < aim$  then

14. Return goal

15. Else if  $aim < p < 1.0$  then

16. Return  $RandomNode()$ ;

# Random node selection: a random number  $p$  is generated. If it is in a certain range, the function returns the target node. Otherwise, a random node is selected.

An example of the RRT algorithm used in the movement of the manipulator is shown in Fig. 2.

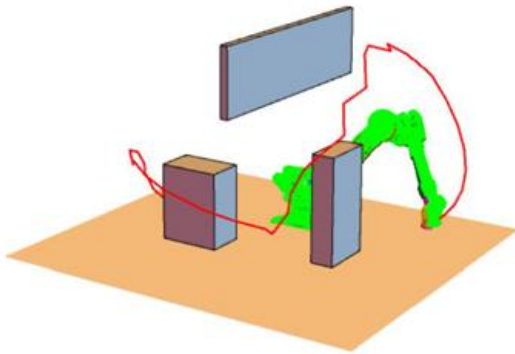


Fig. 2. Use of the RRT algorithm on the manipulator

To accelerate path planning, the random tree is optimized by initially calculating the midpoint between the starting and target positions in the space. The robot first moves toward this midpoint and then proceeds to the final position. This allows the random probability to determine whether the next point is the correct target or a random point. The parameter *aim* is predefined, and a random number *bp* is generated within the range of 0 to 1. When  $0 < bp < aim$ , the random number directs movement toward the target point; when  $aim < bp < 1$ , the random number facilitates growth in a random direction [6].

The RRT algorithm can be employed to compute and output the rotational speed and radians of each joint during the robot's movement, given the initial and target positions as input.

## 2.2. Communication interface design

The communication interface module is utilized to establish a connection between the main computer and the robotic manipulator. This module facilitates the exchange of control commands and feedback transmission between the two entities. Traditional ROS communication is based on ID connections, which are typically employed for a limited number of advanced robots, such as the UR series. However, Controller Area Network (CAN) communication is currently more widely adopted [7]. Thus, in this study, only the path planning algorithm and simulation environment in ROS are used, combined with CAN communication to develop a new communication method.

CAN communication is employed to transmit motor parameters—such as motor identifier, rotational angle, speed, etc.—calculated by the main computer to the control chips of each robot motor, allowing for direct control of the robot. This communication method does not rely on ROS communication and directly interfaces with the motors. This approach enhances existing characteristics of robustness and responsiveness while adding features such as simplicity in communication, broad applicability, and high portability, making it suitable for most robotic manipulators available on the market.

## 2.3. The main process of controlling a manipulator robot

The control process is divided into three parts: trajectory planning operations, communication connections, and motor control. Controlling a robotic manipulator essentially involves managing the rotational angles, speed, and switching time of the motors at each joint. Thus, the steps of the control system are as follows:

- (1) Construct a 3D model of the robot, configure the ROS environment, and set the initial position of the end-effector.
- (2) Launch the configured robot in the ROS 3D visualization environment (Rviz), input the end-effector coordinates via the editing interface, invoke the RRT algorithm to compute the necessary joint angles, velocities, accelerations, and positions required to reach the target position, and sequentially transmit the computed results.
- (3) Establish communication between the main computer and the robotic manipulator using CAN communication. The calculated joint angles and

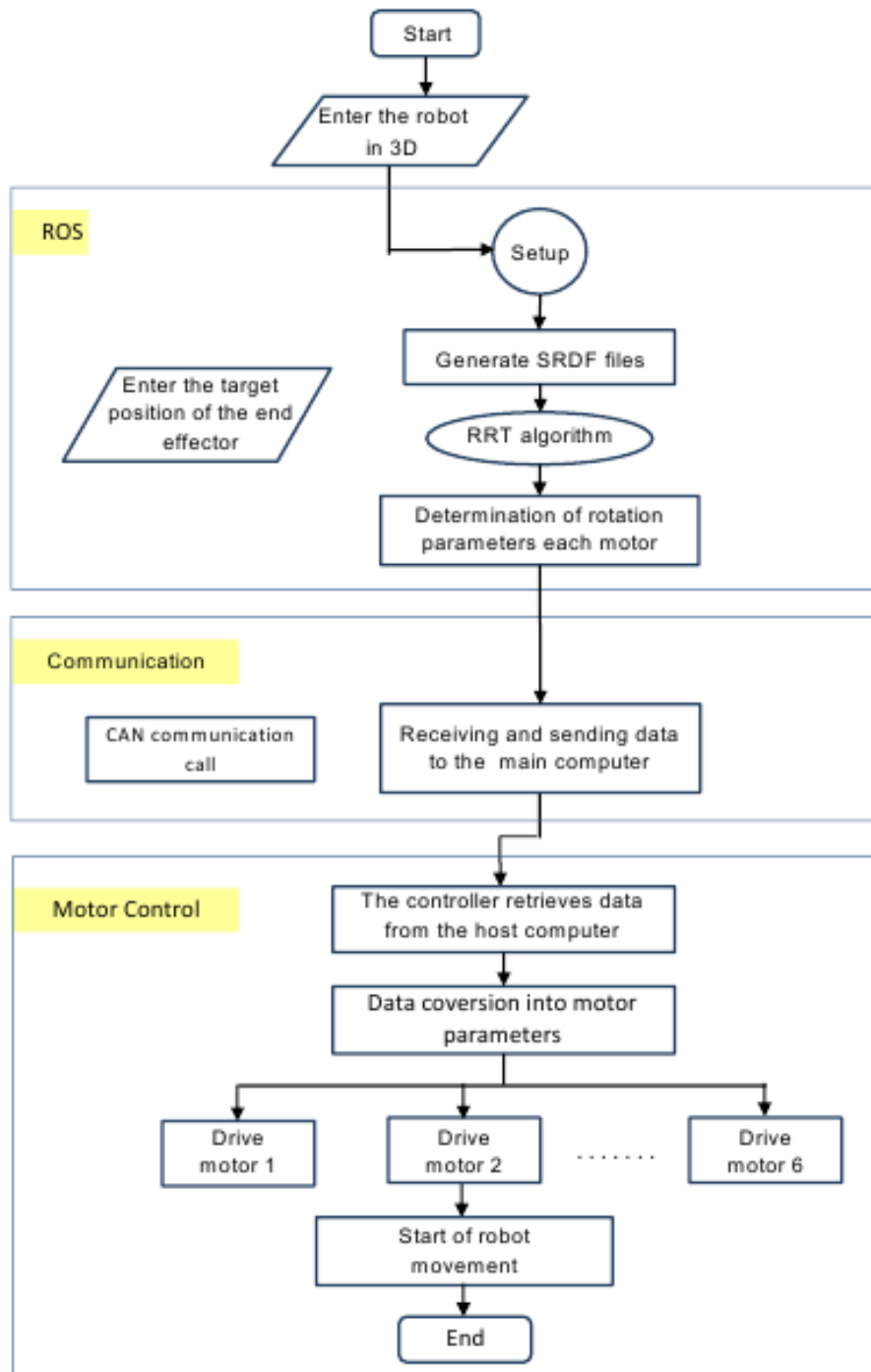


Fig. 3. Block diagram of the robot-manipulator control process

the necessary parameters are sent to the robot through the communication interface.

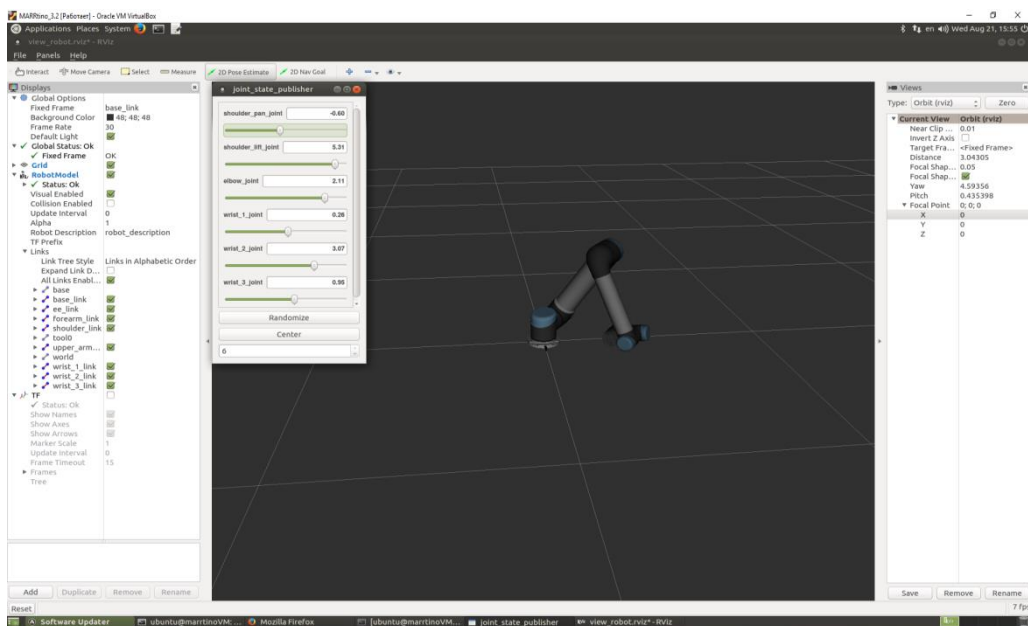
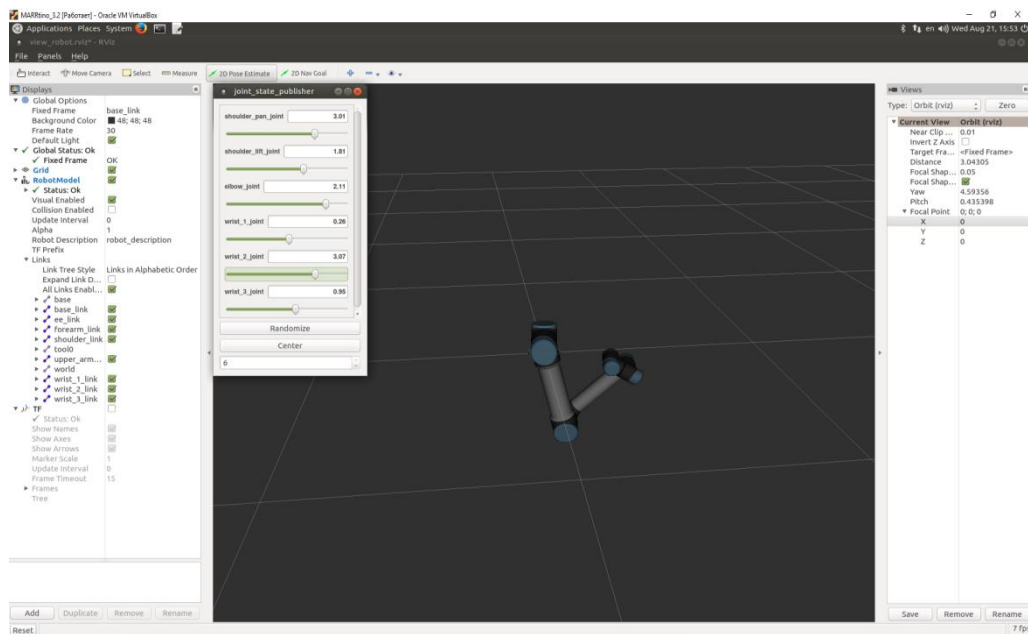
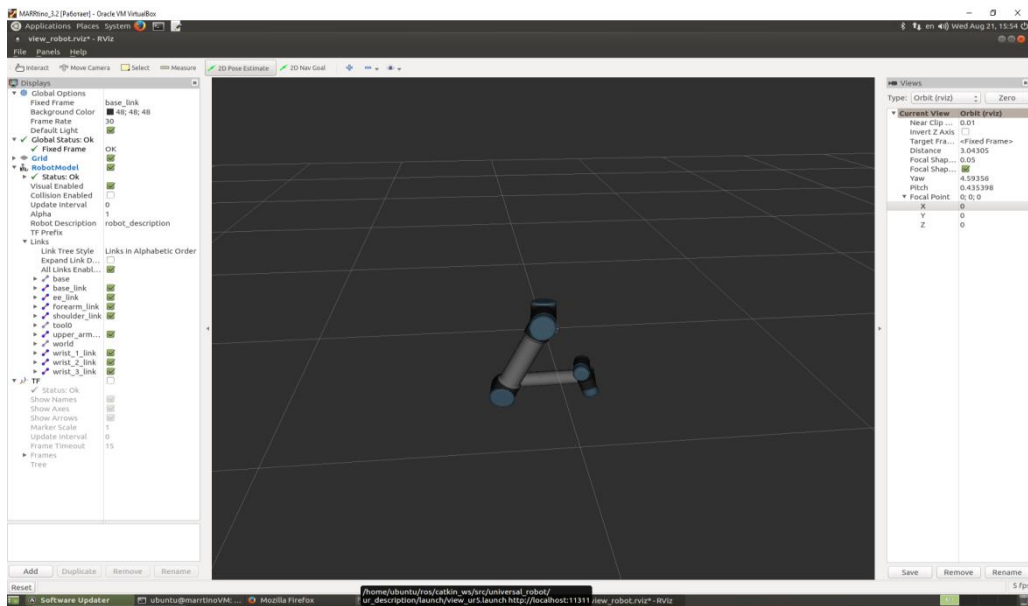
(4) The robot receives the data, converts it into motor motion parameters, and sends these parameters to the motors to control the robot's movement.

### 3. Experimental results and analysis

#### 3.1 A simulation experiment

In the simulation, a control interface is created where the coordinates of the end-effector can be set and modified to control the simulated robot in Rviz.

The initial position of the robot is observed horizontally through the simulation interface, while the target position can be adjusted by either dragging or entering the end-effector coordinates directly into the interface. First, the end-effector coordinates are reset to the initial position. Second, the coordinates of the end-effector are altered in the interface to direct the robot towards the target position. Target positions are assigned to move the robot in each direction, and an appropriate path is planned accordingly. The simulation is illustrated in Fig. 4.



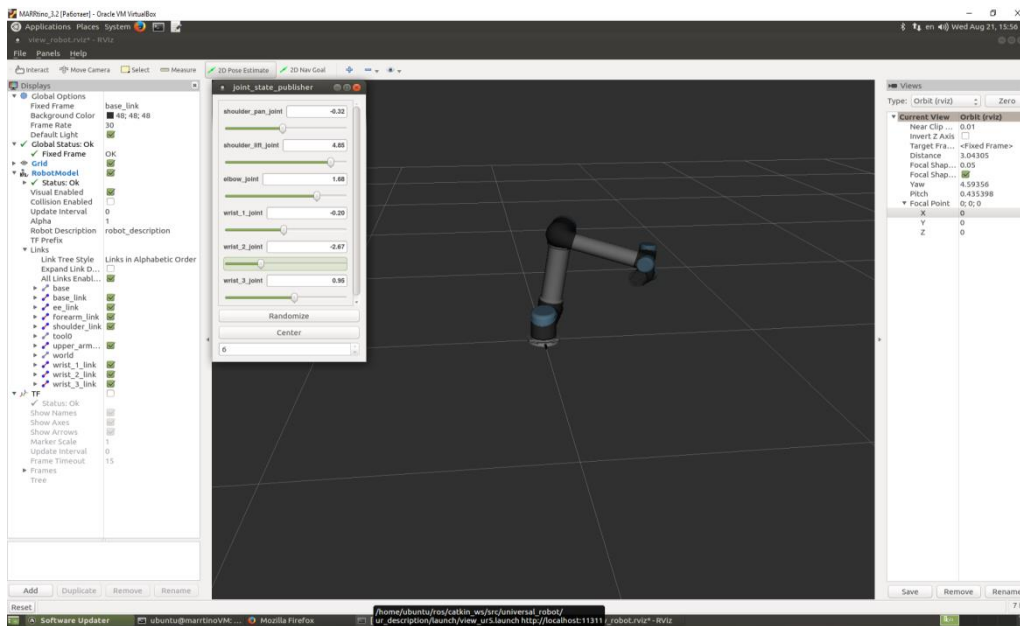


Fig. 4. Simulation of the robot control experiment

The simulation results demonstrate that by inputting the target coordinates of the end-effector, the RRT algorithm can be invoked within the simulation software to compute the rotation angle for each joint, which is then visualized in the simulation interface, thereby achieving control of the simulated robotic manipulator. The specific coordinates used in the experiment are provided in Table 1.

Table 1  
Coordinates of the input end effector

Position points	The specified coordinates
Initial state	(0, 0, 0)
1	(0.3, 0, 0)
2	(0.3, -0.3, 0)
3	(0.3, -0.3, 0.3)

### 3.2 An experiment in controlling a manipulator robot

The UR5 robotic manipulator [8] was used as the physical robot for the experiment. The data was transmitted from the computer interface to a microcontroller located within the robot. The microcontroller processes the received data and converts it into parameters recognizable by the motor, thus controlling the speed and timing of motor rotations. Upon receiving a command from the main computer, the motor controller executes the corresponding action, completing the path planning, and the robot performs the intended motion.

Due to hardware inaccuracies and deviations in the ROS algorithm, the motion parameters sent were calibrated within the control system. The robot

moved at a constant speed, with the absolute positions of the joints being read. The results indicated that the robot did not reach the specified position within a 2 mm margin. After adjusting the control parameters and refining the software, the robot's spatial movement could be precisely controlled via the main computer interface, ensuring high reliability and real-time performance.

By utilizing the ROS print function, detailed information regarding the speed, time, and acceleration for each joint of the robot can be effectively displayed on the output screen. This functionality allows for monitoring the dynamics of the robot's motion in real-time, ensuring that the movements align with the desired trajectory. Table 2 presents the time required for the robot to reach its specified positions after entering the end-effector coordinates provided in Table 1. These output times are critical for evaluating the performance and responsiveness of the system. The recorded times illustrate that the robot's motion is characterized by smooth transitions, exhibiting excellent stability and consistent real-time performance, which is essential for precise and efficient operation in dynamic environments.

Table 2  
The time required to move the robot to the given positions

Position points	Duration (s)
Initial state	0
1	1.94
2	1.89
3	2.02

## Conclusion

In this study, the control of a robotic manipulator was implemented on Ubuntu using ROS. The path planning algorithm was optimized, and the communication between the main computer and the motor controllers in ROS was enhanced to develop a communication method that is both applicable and easy to operate, while maintaining the original real-time performance and reliability. The experimental results clearly demonstrate that the control system can accomplish the primary tasks of a robotic manipulator, indicating its practical application value. However, the development of additional functionalities, such as the implementation of a machine vision system and the design of end-effectors, requires further research to achieve improved outcomes and future advancements.

## References

1. Team Development with Visual Studio Team Foundation Server [Electronic resource]. - URL: <https://visualstudio.microsoft.com/>
2. MATLAB The Language of Technical Computing. [Electronic resource]. - URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>
3. Martinez A. Learning ROS for Robotics Programming[M]. Packt Publishing, 2013.
4. Hart S, Dinh P, Hambuchen K. The Affordance template ROS package for robot task programming. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle, WA, USA. 2015. 6227-6234.
5. Martin SR, Wright SE, Sheppard JW. Offline and online evolutionary bi-directional RRT algorithms for efficient replanning in dynamic environments. Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. Scottsdale, AZ, USA. 2007. 1131-1136.
6. S. Li, D. Zhao, Y. Sun, "Path Planning Algorithm Based on the Improved RRT-Connect for Home Service Robot Arms," 2021 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR), 2021, pp. 403-407, doi: 10.1109/ISR50024.2021.9419385.
7. A. Ghatak, A. A. Kumar, "Controller Area Network Bus based Communication system for Thermal Power Plant," 2020 Third International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAIECC), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAIECC50550.2020.9339516
8. UR5 Robot. [Electronic resource]. - URL: <https://www.rarukautomation.com/collaborative-robots/ur-6-axis-collaborative-robots/ur5-robot/>

## Система управління роботом-маніпулятором на основі ROS

О. В. Стрельцов, Ю. В. Орновецький, М. О. Катріченко,  
В. Г. Поздняков, С. С. Коновалов

Національний університет «Одеська політехніка»

**Анотація.** Для реалізації системи контролю роботом-маніпулятором досліджуються підходи та алгоритми управління. З метою забезпечення надійності та стабільності системи в реальному часі, пропонується створити систему керування роботом-маніпулятором на ПК з ОС Ubuntu, використовуючи ROS та CAN-зв'язок. Практичне тестування системи керування роботом-маніпулятором проведено за допомогою імітаційного експерименту. Результати показали, що система керування роботом-маніпулятором відповідає основним параметрам і вимогам для планування траєкторії руху робота-маніпулятора і здатна встановлювати зв'язок між головним комп'ютером та роботом для керування. Система керування є модульною, компактною, з чіткою структурою та низькою затримкою реагування.

**Ключові слова:** робот-маніпулятор, система ROS, проектування системи управління, алгоритм RRT, комунікаційний інтерфейс.

Отримано 17.02.2025

### About the authors



**Oleh V. Streltsov**, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Computer Systems Department, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: streltsov.o.v@op.edu.ua; ph.: +38 048 705 8473

**Стрельцов Олег Васильович**, к. т. н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: streltsov.o.v@op.edu.ua; тел.: +38 048 705 8473

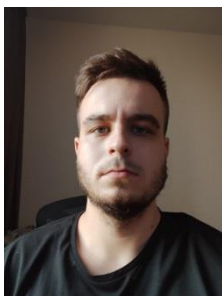
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4691-5703>



**Yuriy V. Ornovetsky**, postgraduate student of the Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: y.ornovetskyi@gmail.com; ph.: +38 063 050 4833

**Орновецький Юрій Васильович**, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: y.ornovetskyi@gmail.com; тел.: +38 063 050 4833

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-2470-1559>



**Mykhailo O. Katrichenko**, postgraduate student of the Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: m\_katrichenko@ukr.net; ph.: +38 063 302 6906

**Катріченко Михайло Олегович**, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: m\_katrichenko@ukr.net; тел. +38 063 302 6906

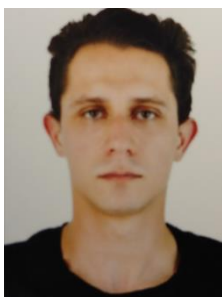
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-2251-5600>



**Vladyslav G. Pozdnyakov**, postgraduate student of the Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: wladpozdnyakov676@gmail.com; ph.: +38 066 227 2373

**Поздняков Владислав Геннадійович**, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: wladpozdnyakov676@gmail.com; тел.: +38 066 227 2373

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-8393-1107>



**Serhiy S. Konovalov**, postgraduate student of the Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: rancor1997@ukr.net; ph.: +38 098 454 6233

**Коновалов Сергій Сергійович**, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: rancor1997@ukr.net; тел.: +38 098 454 6233

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7647-9875>

## Оптимізація обмоткових даних двошвидкісного конденсаторного двигуна

Л. Я. Белікова, А. М. Якімець, С. В. Пернак  
Національний університет «Одеська політехніка»

**Анотація.** Для поширення функціональних можливостей конденсаторних двигунів перспективно застосування в них двох швидкостей. Застосована двофазна двошвидкісна обмотка, із перемиканням кількості полюсів, співвідношення яких складає  $2p_1:2p_2=4:6$ .

Проведені розрахунок та оптимізація обмоткових даних асинхронного двошвидкісного конденсаторного двигуна ДАВ-71-4/6.

**Ключові слова:** схема обмотки, число фаз, оптимізація, обмоткові дані, ККД.

### Вступ

Науково-технічний прогрес у різних галузях народного господарства викликає зростання потреби в електричних машинах малої потужності. Особливе місце у виробництві машин малої потужності займають асинхронні конденсаторні двигуни (АКД), що широко застосовуються в промисловості, сфері обслуговування, побуті, тощо.

### 1. Постановка задач дослідження

За останні роки з'явилося кілька поколінь асинхронних мікродвигунів, виробництво яких ведеться на якісно новому технічному рівні. Успіхи математики й обчислювальної техніки дозволили по-новому розв'язувати задачі проектування АКД із застосуванням ПЕОМ.

При проектуванні АКД великого значення набуває оптимізація обмоткових даних. Задачею оптимізації обмоткових даних АКД є визначення числа витків фаз А (мережевої), В (конденсаторної) і ємності самого фазозсувного конденсатора, при яких двигун буде мати найкращі показники.

Виробництво двошвидкісних АКД із добримими робочими властивостями можливо на базі одношвидкісних за умови їхнього перепроєктування на дві частоти обертання на основі оптимізації обмоткових даних. Це дозволяє обмежитися мінімальними змінами існуючих та налагоджених технологічних процесів.

Для створення конкурентоспроможної електрообутової техніки основну увагу необхідно приділяти поліпшенню її споживчих якостей. Основними технічними вимогами до асинхрон-

асинхронних конденсаторних двигунів (АКД) є кратності пускового –  $k_n$ , максимального –  $k_{max}$  моментів та величина напруги на конденсаторі при холостому ході –  $U_{ко}$ .

Виробництво двошвидкісних АКД із добримими робочими властивостями можливо на базі одношвидкісних за умови їхнього перепроєктування на дві частоти обертання на основі оптимізації обмоткових даних.

Ускладнення виникають при виборі ємності конденсатора, тому що умови пуску вимагають більшої ємності, а економічність устрою в номінальному режимі меншої.

Можливості оптимізації й уточнення перелічених розрахунків двигунів значно розширюються із застосуванням ПЕОМ.

### 2. Розрахунок і оптимізація обмоткових даних конденсаторного двигуна

Покажемо оптимізацію обмоткових даних двошвидкісного конденсаторного двигуна з використанням програмного забезпечення. Це спеціалізована програма «РОАКД» (розрахунки та оптимізація асинхронних конденсаторних двигунів), захищена авторським свідоцтвом [1].

На рис. 1 наведено схеми з'єднання котушкових груп двофазної двошвидкісної обмотки із співвідношенням чисел полюсів  $2p_1:2p_2=4:6$  зі схемою комутації U/UU [2]; кількість пазів статора  $Z_1=24$ .

Схема комутації має п'ять вивідних кінців. Для роботи обмотки з числом полюсів  $2p_2=6$  однофазне живлення подається на з'єднанні разом затискачі 6C1, 6C2 і 0 (рис.1,а). Між затискачем 6C2 і мережею включається конденсатор Ср. Кожна фаза має по одній паралельній гілці.

Для роботи обмотки на  $2p_1=4$  однофазне живлення необхідно подати на з'єднанні разом

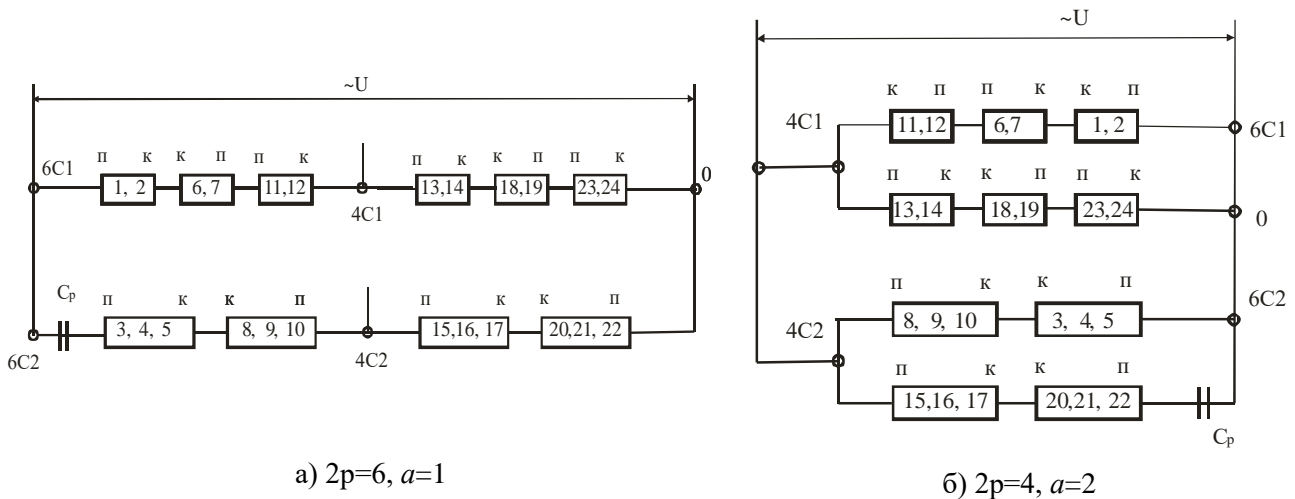


Рис.1. Схеми комутації двошарової обмотки з співвідношенням чисел полюсів  $2p_1:2p_2 = 4:6$ ;  $Z_1 = 24$

затискачі 4C1, 4C2 та 6C1, 6C2, 0 (рис.1,б).

Обмотка при цьому в кожній фазі має по дві паралельні гілки. Конденсатор, як і раніше, включений між мережею і фазою В.

Результати розрахунку гармонійного складу МРС двошарової обмотки для кожного числа полюсів наведені у табл.1. Крок обмотки  $y = 5$ .

Таблиця 1  
Гармонійний склад МРС двошвидкісної обмотки

$V$	$k_{r(p_1=2)}$	$k_{r(p_2=3)}$	$k_{w(p_1=2)}$	$k_{w(p_2=3)}$
1	0,88	0,743	0,85	0,687
3	0,236	0,053	0,167	0,02
5	0,0	0,053	0,0	0,02
7	0,0	0,743	0,0	0,687

В табл.1  $k_{r(p=2)}$ ,  $k_{r(p=3)}$ ,  $k_{w(p=2)}$ ,  $k_{w(p=3)}$  – коефіцієнти розподілу та обмоткові двошвидкісної обмотки для першої вищих гармонік, відповідно, при  $p_1 = 2$  і  $p_2 = 3$ .

Особливу увагу необхідно звертати на амплітуди вищих гармонік, особливо тих, що обертаються назустріч робочій гармоніці (для двофазних машин це  $v=3$  та  $v=7$ ), тому що існування цих гармонік призводить до істотного зменшення пускового електромагнітного моменту.

Розрахунки проводилися на основі геометрії існуючого одношвидкісного конденсаторного двигуна ДАВ-71-4.

Задачею оптимізації є знаходження оптимальних обмоткових даних двофазного двошвидкісного двигуна при заданій геометрії машини ДАВ-71-4, тобто числа витків фази А –  $w_A$  і оптимального коефіцієнта трансформації –  $k_T = w_B/w_A$ .

При розв'язанні задачі будемо використовувати наступні обмежувачі, які задані за технічними умовами (ТУ):

- кратність пускового моменту  $k_n \geq 0,5$ ;
- кратність максимального моменту  $k_{max} \geq 1,7$ ;
- напруга на конденсаторі в режимі холостого ходу –  $U_{KO} \leq 600$  В.

Пошук оптимального варіанта здійснюється методом поетапного перебору  $w_A$  та  $k_T$ . За критерій оптимальності прийнято максимальне значення ККД двигуна  $\eta$  за умови здійснення всіх обмежувачів.

В основу алгоритму пошуку оптимального значення  $k_T$  покладено дослідження залежностей:  $k_n = f(k_T)$ ,  $k_{max} = f(k_T)$ ,  $U_{KO} = f(k_T)$ ,  $\eta = f(k_T)$ .

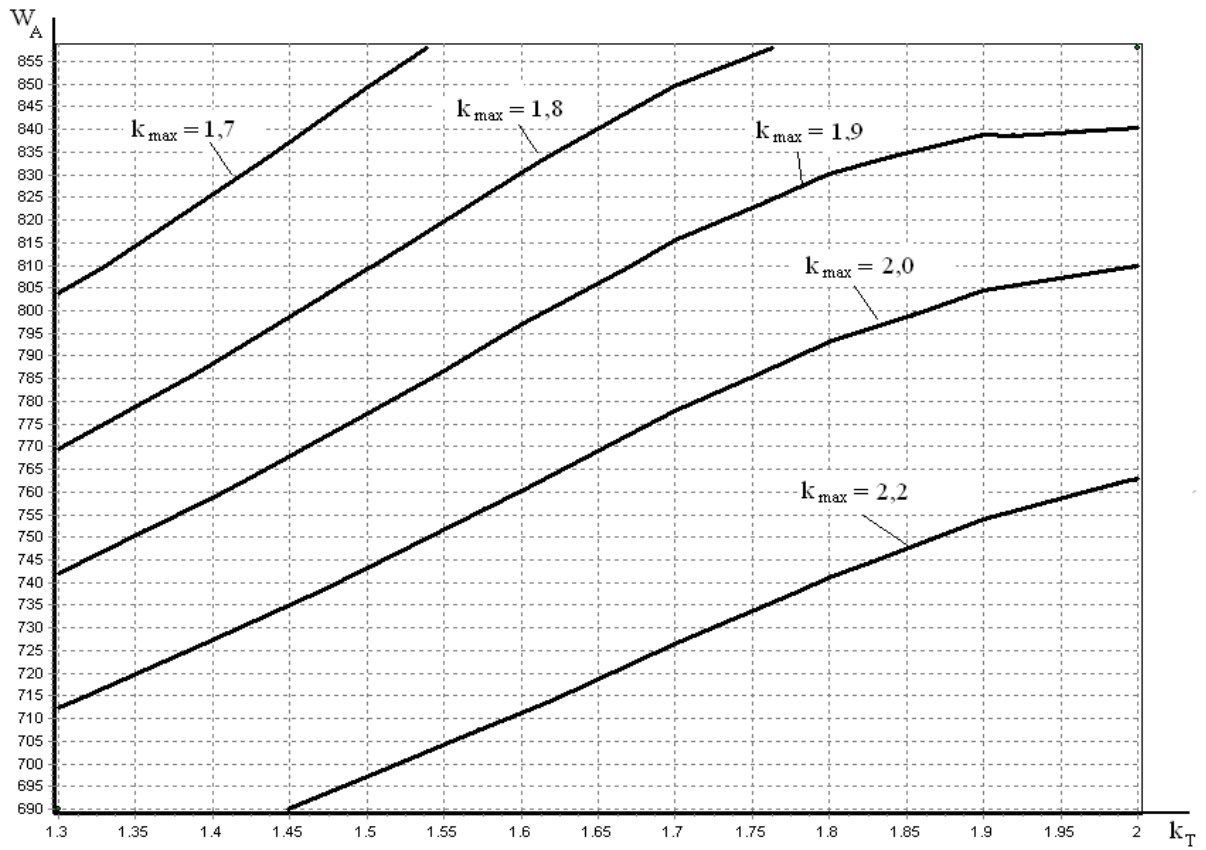
В даній задачі оптимізації дві незалежні перемінні: числа витків фази А –  $w_A$  та коефіцієнт трансформації –  $k_T$ .

Досліджувані характеристики функції цілі: ККД і обмежники: кратності пускового моменту –  $k_n = 0,5$ , максимального –  $k_{max} = 1,7$  та напруги на конденсаторі в режимі холостого ходу –  $U_{KO} = 600$  В.

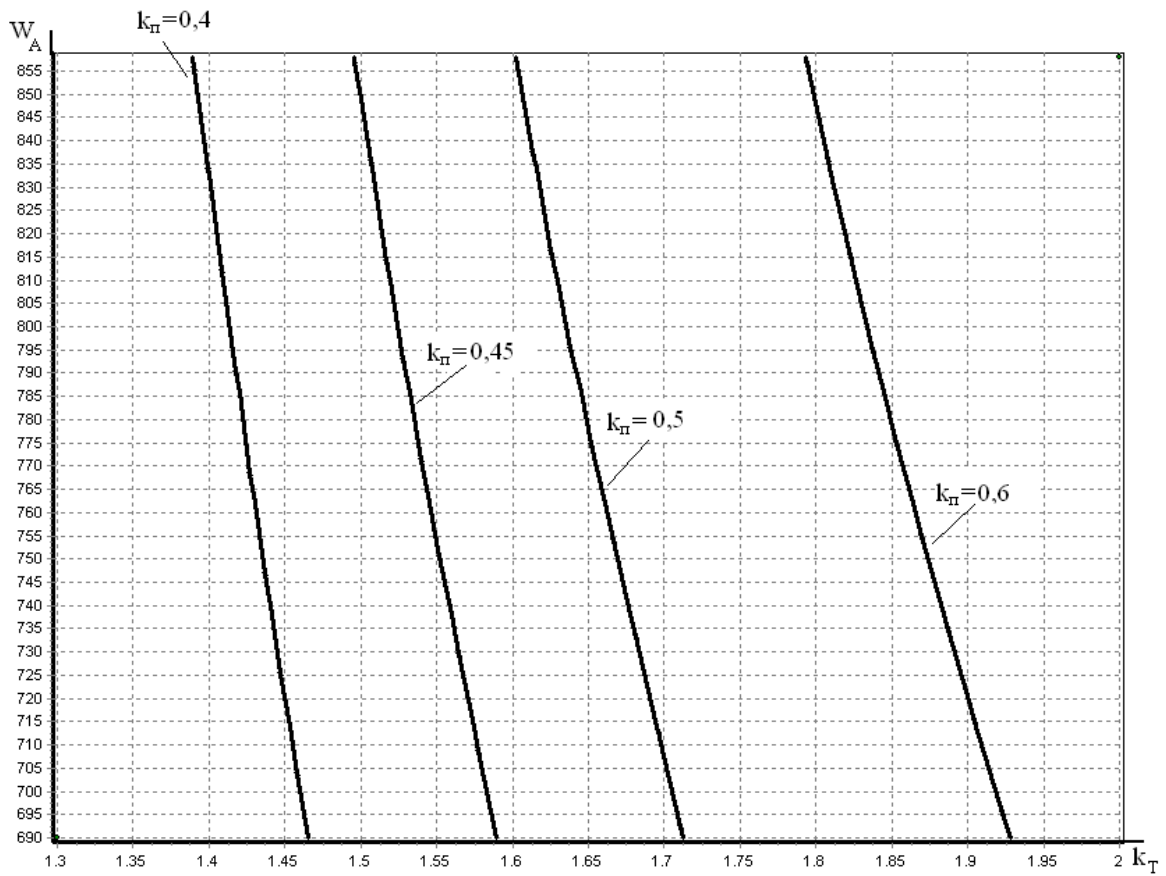
Для двох незалежних змінних найбільш зручна форма представлення величин – лінії однакового рівня досліджуваних характеристик у площині змінних  $w_A$  і  $k_T$ .

Для цього за допомогою програми «РОАКД» здійснено електромагнітні розрахунки варіантів АКД із конденсаторами  $C_p = 6$  мкФ при  $2p = 4$  та  $C_p = 4$  мкФ при  $2p = 6$  та побудовані лінії однакового рівня основних технічних показників  $\eta$ ,  $k_n$ ,  $k_{max}$ ,  $U_{KO}$  у площині змінних  $w_A$  і  $k_T$  для  $2p_1=4$  та  $2p_2=6$ .

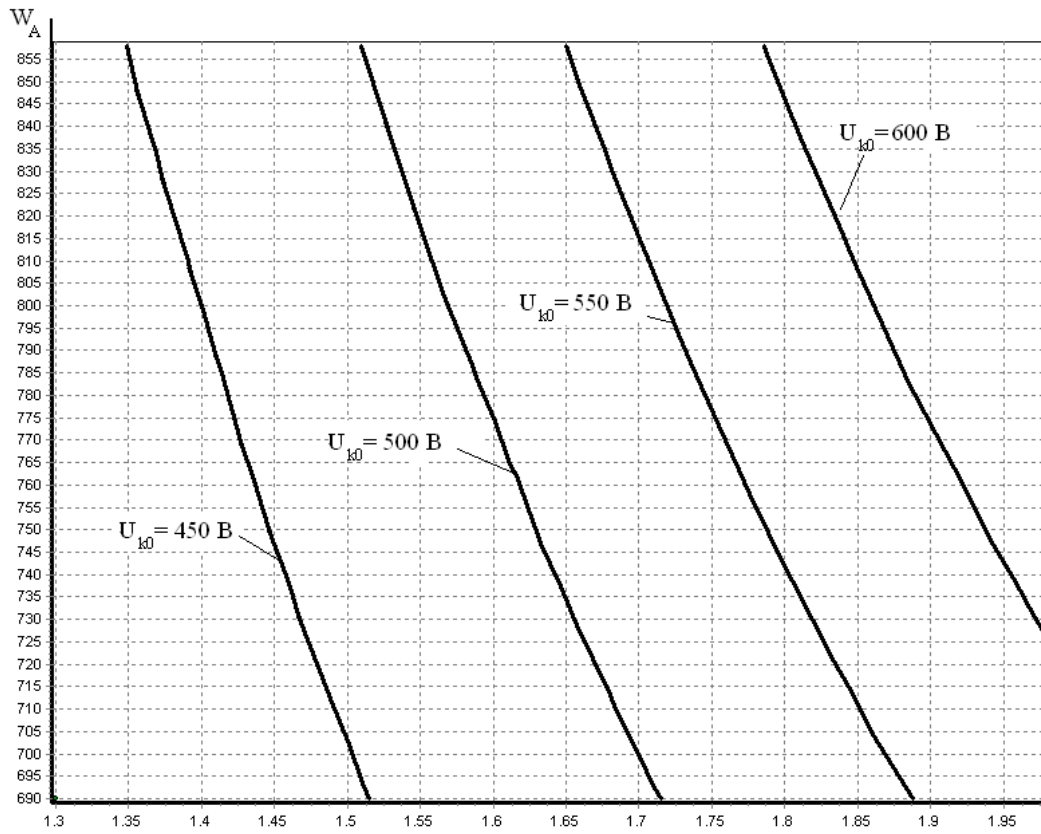
Для  $2p = 4$  ці лінії показані на рис.2. Аналогічні розрахунки було проведено і для полюсності  $2p = 6$ .



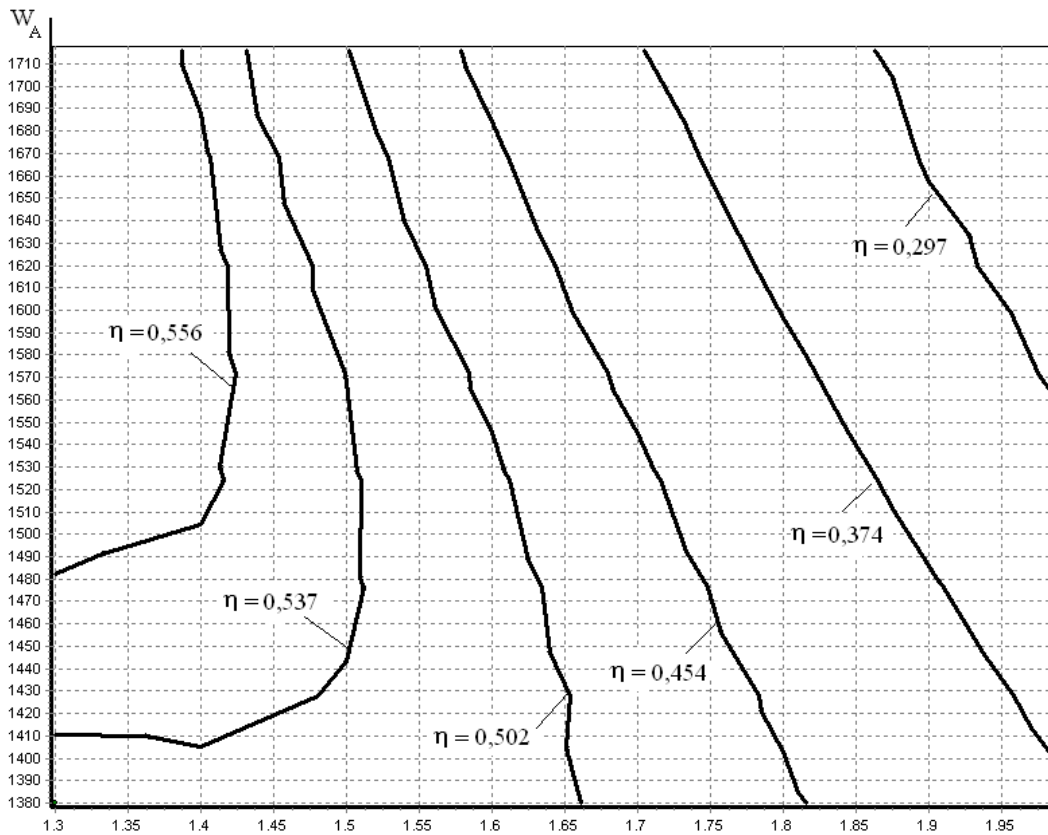
а)  $k_{max} = f(k_T)$



б)  $k_n = f(k_T)$



б)  $U_{k0} = f(k_T)$



г)  $\eta = f(k_T)$

Рис.2. Лінії однакоого рівня для ДАВ-71 4/6 при  $2p = 4$ ,  $C_p = 6$  мкФ

На рис. 3 у площині змінних  $w_A$  та  $k_T$  наведені лінії однакового рівня основних технічних показників для  $k_{max} = 1,7$ ;  $k_n = 0,5$ ;  $U_{KO} = 600$  В при  $2p_1 = 4$ :

а) при використанні в якості робочого конденсатора ємності величиною  $C_p = 6$  мкФ та із полюсністю  $2p_2 = 6$ ;

б) при використанні в якості робочого конденсатора ємності величиною  $C_p = 4$  мкФ.

Тут же показані лінії однакового рівня ККД -  $\eta$  та коефіцієнта потужності  $\cos\phi$ .

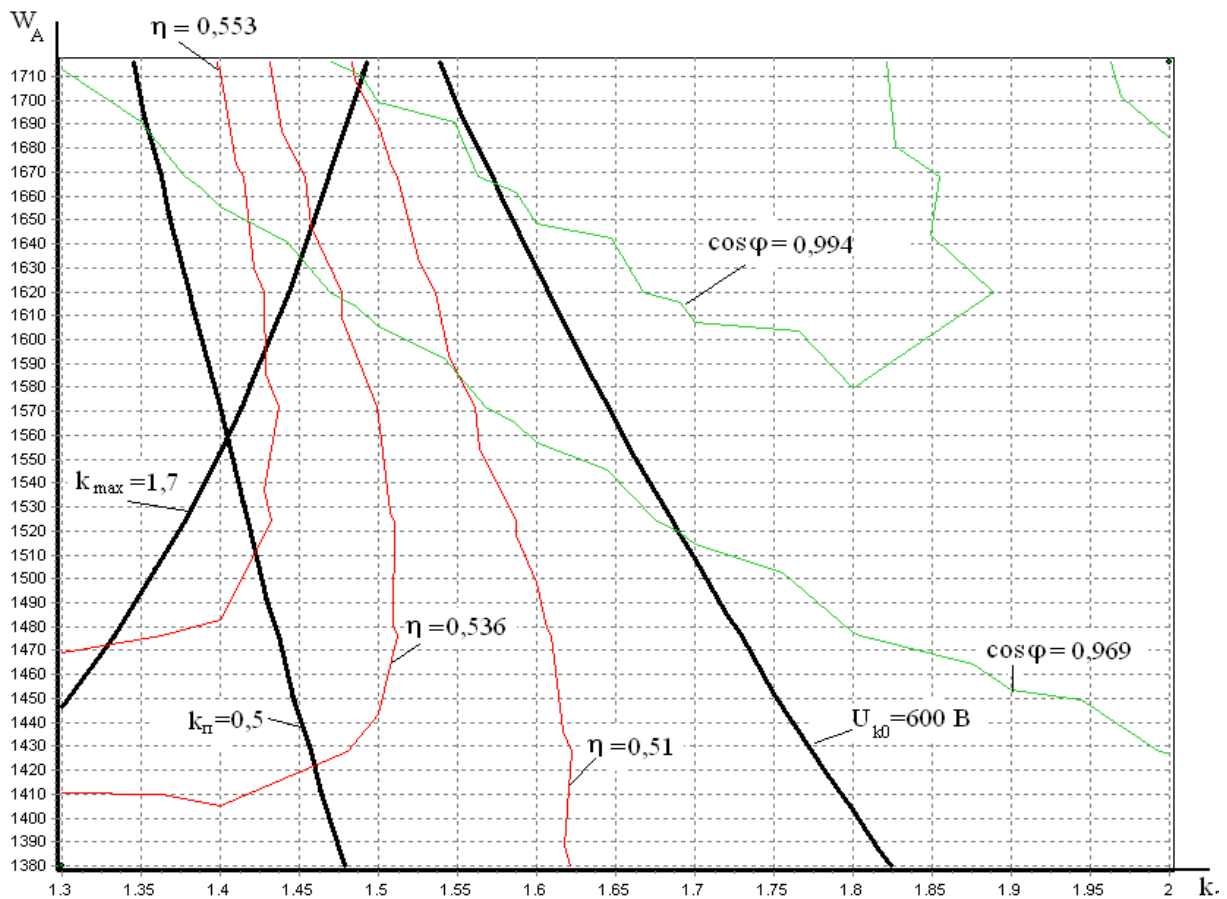
Кожна з ліній однакового рівня, що відповідає технічному показнику, ділить площину на дві області. У одній з областей знаходяться значення обмоткових даних, що задовольняють технічним умовам (ТУ), в іншій – що не задовольняють.

Сполучення ліній однакового рівня утворюють

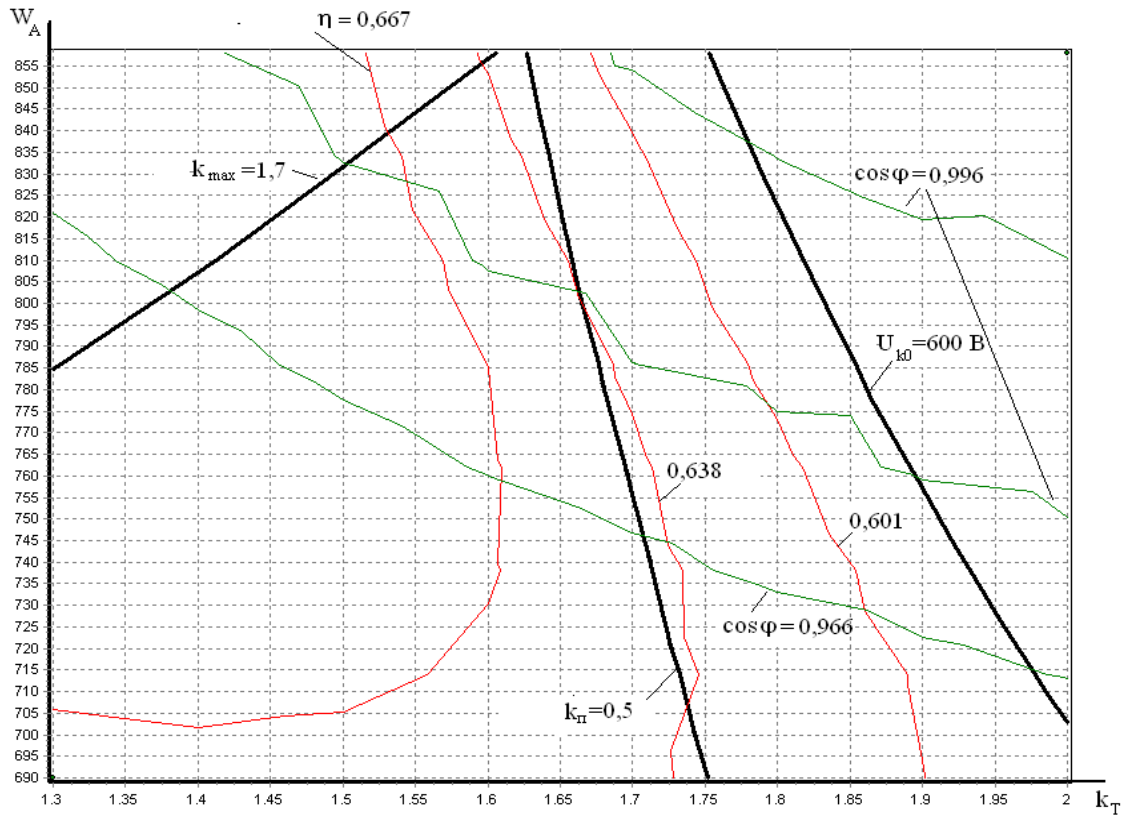
опуклу допустиму область обмоткових даних, при яких виконуються всі задані за ТУ показники, тобто:  $k_{max} \geq 1,7$ ;  $k_n \geq 0,5$ ;  $U_{KO} \leq 600$  В.

На рис.4 зображені лінії однакового рівня технічних показників та показана допустима область обмоткових даних двошвидкісного АКД після поєднання ліній при  $p_1 = 2$  та при  $p_2 = 3$ . Тут має місце перетинання областей. Штрихуванням виділена допустима область (ДО) обмоткових даних для двошвидкісного двигуна.

В спільній допустимій області обмоткових даних на рис.4 необхідно знайти число витків фази А та коефіцієнт трансформації  $k_T$ , при яких асинхронний конденсаторний двигун ДАВ-71-4/6 буде мати максимально можливе значення ККД на обох частотах обертання при забезпеченні всіх заданих за ТУ показників.



а)  $2p = 4$ ,  $C_p = 6$  мкФ



б)  $2p=6, C_p=4$  мкФ

Рис. 3. Лінії однакового рівня основних технічних показників для ДАВ-71-4/6 при  $2p=4$  та  $2p=6$

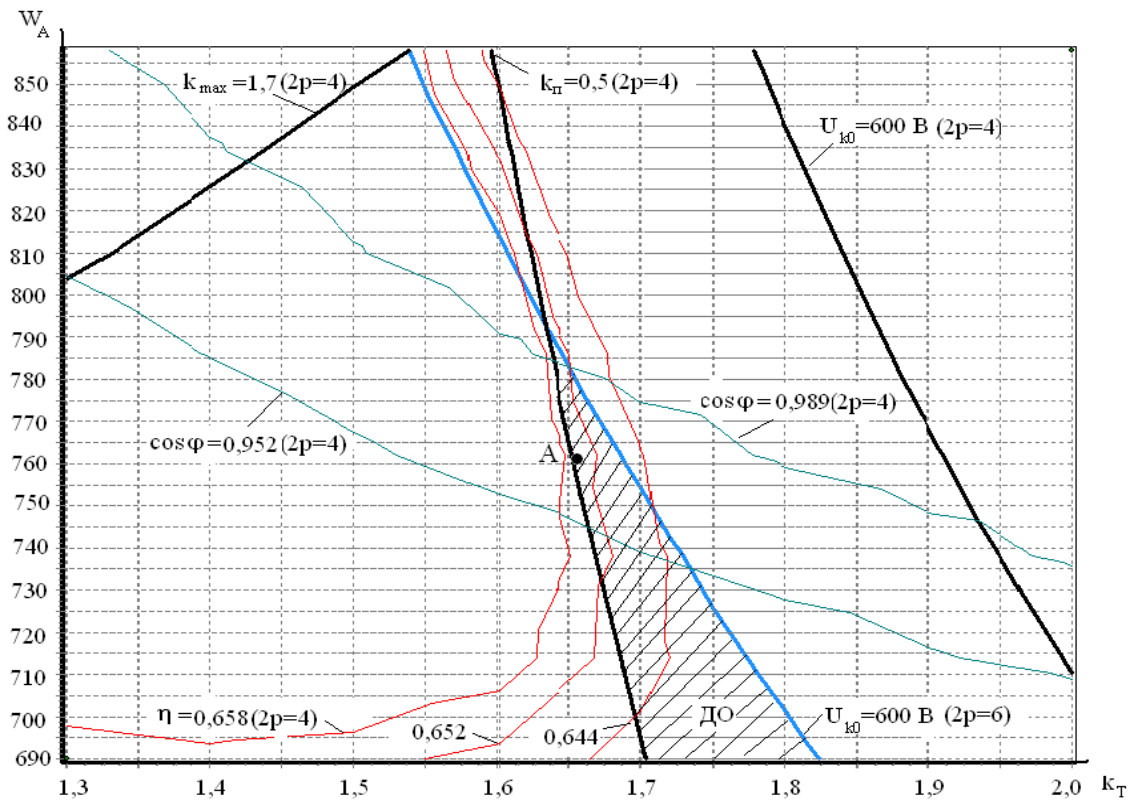


Рис. 4. Лінії однакового рівня основних технічних показників і спільна допустима область (ДО) обмоткових даних АКД ДАВ-71-4/6, з двошвидкісною двошаровою обмоткою  $C_p=6$  мкФ при  $2p=4$  та  $C_p=4$  мкФ при  $2p=6$

Із рис. 4 видно, що величина коефіцієнта трансформації  $k_T$  праворуч обмежена величиною напруги на конденсаторі в режимі холостого ходу при  $2p_2=6$ , ліворуч – кратністю пускового моменту при  $2p_1=4$ . Число витків фази А не може бути менше певного числа, тому що при цьому зменшується кратність пускового моменту при  $2p_1=4$  і не може бути більше певного числа, тому що при цьому збільшується напруга на конденсаторі у режимі холостого ходу при  $2p_2=6$  та зменшується значення ККД при  $2p_1=4$ .

Коефіцієнт корисної дії АКД  $\eta$  збільшується при зменшенні коефіцієнта трансформації  $k_T$ , як при роботі на нижчій, так і при роботі на вищій частотах обертання. Тому оптимальні обмоткові дані перебувають на межі допустимої області, а саме уздовж лінії  $k_n \geq 0,5$  ( $2p_1=4$ ).

Значення оптимального коефіцієнта трансформації перебуває в межах значень  $k_T=1,65\dots 1,75$ . Оптимальне число витків фази А перебуває в діапазоні  $w_A=720\dots 790$  при  $2p_1=4$ .

Результати розрахунків двигуна ДАВ-71-4/6 за програмою «РОАКД» та пошук оптимального за ККД варіанту наведено у табл. 2.

У цій таблиці крім обмоткових даних наведені номінальні значення ККД -  $\eta$ , коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$ , а також кратності пускового  $k_n$ , максимального  $k_{max}$  моментів, напруга на конденсаторі  $U_{KO}$ , та коефіцієнт трансформації  $k_T$ .

Кращим варіантом можна вважати варіант №4, для якого виконуються всі технічні показники при роботі на обох частотах обертання і мають місце максимальні значення ККД та  $\cos\varphi$ .

Таблиця 2

Результати розрахунків варіантів ДАВ 71-6/4 із двошвидкісною двошаровою обмоткою  
 $C_p=6$  мкФ при  $2p_1=4$ ,  $P_n 2p_4=180$  Вт,  $C_p=4$  мкФ при  $2p_2=6$ ,  $P_n 2p_6=80$  Вт

№	p	$w_A$	$w_B$	$q_A$	$q_B$	$\eta$	$\cos\varphi$	$k_n$	$k_m$	$U_{KO}$	$k_T$
	-	ВИТ	ВИТ	мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>	%	в.о.	в.о.	в.о.	В	
1	2	744	1296	0,125	0,0707	63,9	0,965	0,539	2,18	533	1,74
	3	1488	2592			45,6	0,964	0,76	1,8	614	
2	2	750	1260	0,125	0,0707	65,2	0,967	0,497	2,09	520	1,68
	3	1500	2520			47,9	0,957	0,712	2,1	587	
3	2	756	1272	0,125	0,0707	65,1	0,974	0,497	2,07	524	1,68
	3	1512	2544			47,6	0,964	0,72	2,09	594	
4	2	<b>762</b>	<b>1260</b>	<b>0,125</b>	<b>0,0707</b>	<b>65,8</b>	<b>0,971</b>	<b>0,505</b>	<b>2,09</b>	<b>512</b>	<b>1,65</b>
	3	<b>1524</b>	<b>2520</b>			<b>48,5</b>	<b>0,964</b>	<b>0,7</b>	<b>2,05</b>	<b>584</b>	
5	2	768	1272	0,119	0,0707	65,6	0,979	0,504	2,04	517	1,66
	3	1536	2544			48,0	0,972	0,706	2,03	592	
ТУ						$\geq 52$	$\geq 0,85$	$\geq 0,5$	$\geq 1,7$	$\leq 600$	

### Висновки

Наведений алгоритм розрахунку обмоткових даних із допустимої області дозволяє вибрати оптимальні обмоткові дані двошвидкісного АКД при будь-яких заданих за ТУ показниках.

При необхідності збільшення пускових властивостей АКД на  $2p_1=4$  варто збільшити ємність робочого конденсатора. Але слід пам'ятати, що коефіцієнт корисної дії при цьому зменшується.

### Список використаної літератури

1. Белікова Л. Я., Смірнов С. Б. Комп'ютерна програма «Розрахункова-оптимізаційна програма «РОАКД». Розрахунок асинхронних конденсаторних двигунів та оптимізація обмоткових даних». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 25526 від 29.08.09.

2. Белікова Л. Я. Спеціальні обмотки асинхронних двигунів. Монографія. С-167, 2024р. <http://dspace.opu.ua/jspus/handle/123456789/14545>

## References

1. Bielikova L. Ya., Smirnov S. B. Computer program "Calculation and optimization program "ROAKD". Calculation of asynchronous capacitor motors and optimization of winding data". Certificate of registration of copyright for the work No. 25526 dated 29.08.09.
2. Bielikova L. Ya., Special windings of induction motors. Monograph. C-167, 2024. <http://dspace.opu.ua/jspus/handle/123456789/14545>

# Optimization of winding data of a two-speed capacitor motor

L. Ya. Belikova, A. M. Yakimets, S. V. Pernak

*Odesa Polytechnic National University*

**Abstract.** To expand the functional capabilities of capacitor motors, it is promising to use two speeds. A two-phase two-speed pole-switching winding with a pole ratio of  $2p_1:2p_2=4:6$  is used.

Calculation and optimization of winding data of the asynchronous two-speed capacitor motor DAV-71-4/6 are performed.

**Keywords:** winding diagram, number of phases, optimization, winding data, efficiency.

Отримано 21.12.2024

## Про авторів



**Бєлікова Людмила Яківна**, к. т. н., доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: [conda@ukr.net](mailto:conda@ukr.net); тел. +38 066 699 3342.

**Liudmyla Ya. Bielikova**, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: [conda@ukr.net](mailto:conda@ukr.net); ph.: +38 066 699 3342

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5999-8205>



**Якімець Андрій Миронович**, к. т. н., доцент, завідувач кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: [a.m.yakimets@op.edu.ua](mailto:a.m.yakimets@op.edu.ua); тел. +38 097 219 6702

**Andrii M. Yakimets**, Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: [a.m.yakimets@op.edu.ua](mailto:a.m.yakimets@op.edu.ua); ph.: +38 097 219 6702

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0588-8606>



**Пернак Сергій Володимирович**, магістрант кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: [sergey.per4nak@gmail.com](mailto:sergey.per4nak@gmail.com); тел. +38 096 624 1409

**Serhiy V. Pernak**, Master's student of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: [sergey.per4nak@gmail.com](mailto:sergey.per4nak@gmail.com); ph.: +38 0966 24 1409

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-0523-8077>

## Оцінка пози людини в інтелектуальних системах відеоспостереження: сучасні підходи та виклики

Р. В. Ковалевич, Д. Д. Курінько, В. І. Кривда  
Національний університет «Одеська політехніка»

**Анотація.** У статті представлений огляд сучасних методів оцінки пози людини в інтелектуальних системах відеоспостереження. Розглянуто 2D та 3D підходи, включаючи як класичні методи, так і моделі на основі глибокого навчання. Проаналізовано особливості *top-down* і *bottom-up* стратегій, їх переваги та обмеження. Визначено основні виклики, пов'язані з реальними умовами спостереження, зокрема оклюзіями, зміною освітлення та обмеженою якістю зображень. Окреслено перспективи розвитку галузі, зокрема використання 6D оцінки пози, мультисенсорних даних і самонавчальних моделей.

**Ключові слова:** інтелектуальні системи, відеоспостереження, аналіз поведінки, оцінка пози, нейронні мережі, теплові карти, багатокамерні системи, оклюзії.

### Вступ

У сучасному світі відеоспостереження стало невід'ємною складовою систем безпеки, управління міською інфраструктурою, моніторингу громадського порядку та контролю доступу.

Традиційні системи відеоспостереження здебільшого виконували пасивну функцію – накопичення відеоданих для подальшого перегляду оператором. Проте зі стрімким розвитком технологій комп'ютерного зору та глибокого навчання виникла нова парадигма – інтелектуальні системи відеоспостереження, здатні до автоматизованої інтерпретації сцени в реальному часі [1].

Одним з ключових напрямів розвитку таких систем є оцінка пози людини (англ. *human pose estimation*) — процес визначення просторового положення ключових точок людського тіла на основі зображення або відео потоку [2].

Інформація про позу є основою для більш складних завдань, таких як розпізнавання активності, виявлення аномальної поведінки, відстеження осіб, інтерфейси «людина-машина» та навіть передиктивна аналітика у сфері безпеки.

Сучасні методи оцінки пози поділяються на два основні класи — двовимірна (2D) та тривимірна (3D) оцінка. 2D-методи передбачають локалізацію ключових точок тіла на площині зображення й зазвичай реалізуються за допомогою згорткових нейронних мереж, які прогнозують координати основних суглобів у пікселях [3].

Вони є менш ресурс втратними та широко застосовуються в реальному часі у відеоспостереженні.

Водночас 3D-оцінка пози надає глибше розуміння просторової конфігурації тіла, дозволяє враховувати перспективні спотворення та отримувати положення частин тіла у фізичному просторі. Проте такі методи зазвичай вимагають або використання глибоких сенсорів, або складних моделей реконструкції на основі одного або кількох зображень.

Незважаючи на активний прогрес, задача оцінки пози в умовах реальних систем відеоспостереження залишається складною. На результати негативно впливають такі чинники, як змінні умови освітлення, шум, часткове перекриття об'єктів, різні ракурси камер, обмеження роздільної здатності тощо. В умовах публічного середовища додаткову складність створює наявність кількох людей у кадрі та постійна динаміка сцени (рис. 1) [4].

В реальних умовах виявлення людей і прогнозування пози стикаються з різними перешкодами: залізничні колії, кабелі електропередач і трамваї, що рухаються, блокують різні частини зображення; кут нахилу камери створює розбіжності в розмірах людини [4].

З огляду на актуальність проблематики, у науковій спільноті зростає інтерес до систематизації знань у цій галузі, порівняння наявних підходів, аналізу їх ефективності, а також визначення векторів майбутніх досліджень.

Метою даної статті є систематизація сучасних підходів до оцінки пози людини в інтелектуальних системах відеоспостереження, аналіз



Рис.1. Реальні умови виявлення людей і прогнозування пози.

основних методів 2D та 3D оцінки пози, їх переваг, недоліків та сфер застосування, а також окреслення актуальних викликів і перспектив подальшого розвитку цієї області досліджень.

### 1. Загальна постановка задачі

Оцінка пози (положення та конфігурації тіла) людини є однією з ключових задач у галузі комп'ютерного зору, зокрема в контексті інтелектуальних систем відеоспостереження. Метою такої задачі є автоматичне виявлення та відстеження просторового положення ключових точок тіла людини на основі вхідних відеоданих.

*Вхідні дані.* Розглянемо відеопотік, який представляється як послідовність кадрів:

$$I = \{i_1, i_2, \dots, i_t\}, \quad i_t \in \mathbb{R}^{(H \times W \times 3)}, \quad (1)$$

де  $t$  – кількість кадрів,  $H$  та  $W$  – висота та ширина кадру відповідно,  $i_t$  – кольорове зображення в момент часу  $t$ .

*Задача.* Для кожного кадру  $i_t$  необхідно визначити набір ключових точок  $K_t = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ , які відповідають основним анатомічним орієнтирам тіла людини: голова, плечі, лікті, кисті, таз, коліна, стопи тощо. Кожна точка  $k_i$  задається координатами на площині зображення:

$$k_i = (x_i, y_i), \quad x_i \in [0, W], \quad y_i \in [0, H]. \quad (2)$$

У випадку тривимірної оцінки пози використовується просторове представлення:

$$k_i = (x_i, y_i, z_i), \quad (x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3, \quad (3)$$

де  $z_i$  відображає глибину точки в просторі або відстань до камери.

У випадку, коли на зображенні присутні декілька людей, поза кожної людини визначається окремо. Тоді вихідний набір поз для кадру має вигляд:

$$P_t = \{K_t^{(1)}, K_t^{(2)}, \dots, K_t^{(M_t)}\}, \quad (4)$$

де  $M_t$  – кількість людей у кадрі в момент часу  $t$ ,  $K_t^{(j)}$  – набір ключових точок для  $j$ -ої людини.

*Мета* – знайти відображення:

$$f: I \rightarrow \{P_1, P_2, \dots, P_t\}, \quad (5)$$

яке для кожного кадру  $i_t$  забезпечує точне і стійке визначення просторового положення ключових точок усіх людей у сцені.

*Вимоги до системи розпізнавання пози.*

Точність – висока відповідність оцінених координат ключових точок істинним (референтним) значенням. Може оцінюватися, наприклад, за метрикою PCK (Percentage of Correct Keypoints), як відсоток правильних ключових точок [5]:

$$PCK@ \alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{I} \left( \frac{\|\hat{k}_i - k_i\|_2}{d} < \alpha \right), \quad (6)$$

де  $\hat{k}_i$  – прогнозована позиція точки,  $k_i$  – істинна позиція точки,  $d$  – нормалізуючий коефіцієнт

(наприклад, відстань між плечима),  $\alpha$  – заданий поріг.

Стійкість – система повинна коректно працювати в умовах часткового перекриття, різного освітлення, різних масштабів та ракурсів.

Продуктивність – алгоритм повинен працювати в режимі реального часу або близькому до реального, з мінімальною затримкою обробки (наприклад, не менше 15–30 кадрів за секунду).

Масштабованість – можливість одночасної обробки кількох людей в кадрі.

## 2. Двовимірна та тривимірна оцінка пози людини в інтелектуальних системах відеоспостереження

У контексті інтелектуальних систем відеоспостереження, які призначені для автоматизованого аналізу поведінки людини, ключовим етапом оцінки пози людини є локалізація та інтерпретація пози у дво- або тривимірному просторі.

*Двовимірна оцінка пози.* У більшості практичних застосувань відеоспостереження використовується двовимірна оцінка пози (2D pose estimation).

Це пов'язано з відсутністю просторової інформації про глибину сцени у стандартних відеокамерах та вимогою до реального часу обробки. Двовимірна оцінка полягає у знаходженні координат  $N$  ключових точок людського тіла на площині зображення:

$$K^{(2D)} = \{k_i \in \mathbb{R}^2 | k_i = (x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N\}. \quad (7)$$

Ключові точки можуть включати: верхівку голови, шию, плечі, лікті, кисті, таз, коліна та щиколотки. Визначення таких точок часто реалізується за допомогою згорткових нейронних мереж, які прогнозують теплові карти (heatmaps):



Рис.2. Ілюстрація задачі двовимірної оцінки пози [6]

$$H_i: \mathbb{R}^{H \times W} \rightarrow [0, 1], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

де значення  $H_i(x, y)$  характеризує ймовірність наявності  $i$ -ої точки у пікселі  $(x, y)$ . Найімовірніше положення точки визначається як:

$$k_i = \arg \max_{(x, y)} H_i(x, y). \quad (9)$$

Двовимірна поз є інваріантною до абсолютного масштабу сцени, однак не дозволяє точно визначити глибину об'єкта або просторові кути суглобів.

*Тривимірна оцінка пози людини.* На відміну від двовимірних підходів, тривимірна оцінка пози (3D pose estimation) передбачає реконструкцію просторового положення ключових точок:

$$K^{(3D)} = \{p_i \in \mathbb{R}^3 | p_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, N\}, \quad (10)$$

де координата  $z_i$  відображає глибину (відстань від камери або вертикальну компоненту у світовій системі координат) (рис. 3).

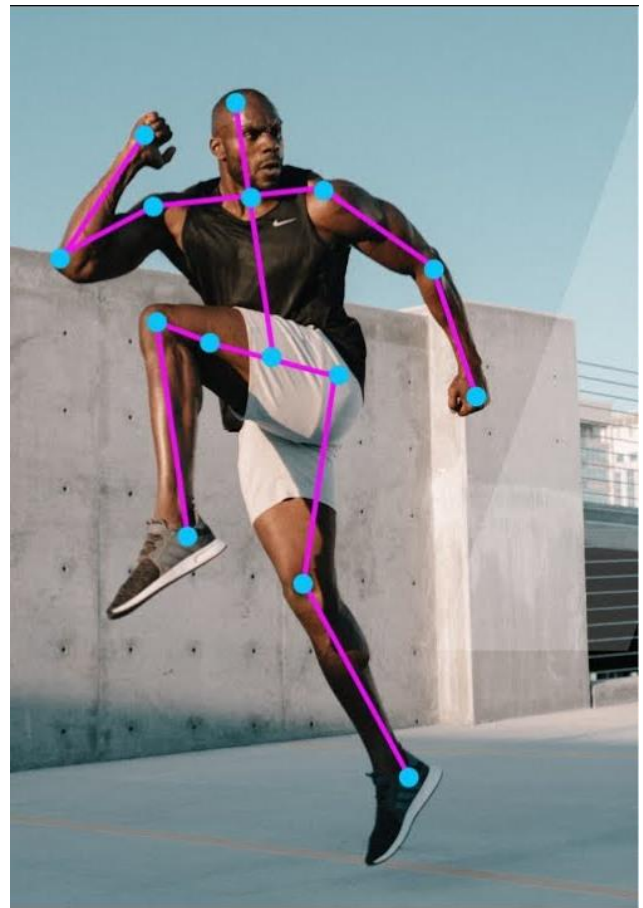


Рис.3. Ілюстрація задачі тривимірної оцінки пози [7]

У системах з однією камерою оцінка  $Z_i$  є неоднозначною і потребує або навченої моделі для «відновлення» глибини з двовимірних даних, або додаткових сенсорів (наприклад, стереокамер, глибинних камер або мультикамерних систем).

При наявності каліброваної камери (тобто з відомою матрицею внутрішніх параметрів  $K$ ) можна здійснити проєкцію 3D точок у 2D зображення за допомогою проєктивного перетворення:

$$\lambda \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot [R|t] \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де  $(u_i, v_i)$  – координати точки на зображенні,  $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  – матриця обертання,  $t \in \mathbb{R}^3$  – вектор трансляції,  $\lambda$  – масштабний коефіцієнт.

Таким чином, задачу можна подати як зворотну до проєкції: за відомими 2D точками та параметрами камери – відновити положення в просторі.

В таблиці 1 наведена порівняльна характеристика задач двовимірної та тривимірної оцінки пози людини в інтелектуальних системах відеоспостереження.

Таким чином, у типових інтелектуальних системах відеоспостереження, де головною метою є виявлення, відстеження та базовий аналіз активності людини, використовується 2D оцінка пози через її обчислювальну ефективність та відсутність вимог до спеціалізованого обладнання.

Проте у випадках, коли потрібна більш глибока просторова інтерпретація (наприклад, для виявлення падінь, агресії або складних патернів поведінки), доцільним є використання 3D оцінки пози, за умови наявності відповідних технічних засобів.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика задач 2D та 3D оцінки пози людини

Характеристика	2D оцінка	3D оцінка
Вихідні координати	$(x, y)$	$(x, y, z)$
Обладнання	Звичайна камера	Глибинна, стерео, багатокамерна система
Обчислювальна складність	Нижча	Вища
Точність положення	В межах зображення	У реальних метричних одиницях
Застосування	Безпека, спостереження, аналітика	Медичні системи, спорт, робототехніка

### 3. Виклики та перешкоди задачі оцінки пози людини

Оцінка пози людини під час відеоспостереження є складним завданням. На відміну від лабораторних умов, камера веде безперервну зйомку вдень і вночі за різних погодних умов протягом усього року. Влітку відбиття від мобільного телефону може частково затуляти камеру, залізничні колії, що заважають людським формам, різки тіні, які можуть призвести до хибно позитивних спрацьовувань, як показано на рисунку 4.



Рис.4. Приклади спотворення камери [8]

[8], освітлення в межах однієї і тієї ж сцени може сильно відрізнятись, як показано на рисунку 5, а [8]. Крім того, через природу відеоспостереження зображення часто сильно спотворені, а камери здебільшого встановлені на висоті та під нахи-

лом, щоб забезпечити велике поле зору. Така перспектива камери підкреслює затінення іншими об'єктами або самим собою, а іноді навіть власною тінню, як показано на рисунках 5, а і 5, б [8].



а) люди, які частково або повністю затінені тінями навколишнього середовища



б) складні, заплутані і закриті пози

Рис.5. Ілюстрація проблем реальних сценаріїв

Аналіз наукових робіт, присвячених вирішенню задачі оцінки пози людини в інтелектуальних системах відеоспостереження, дозволив визначити такі перешкоди та виклики:

- оклюзії – коли частина об'єкта прихована або заблокована іншим об'єктом, це створює значні труднощі для точної оцінки пози. У багатьох реальних сценаріях частини тіла можуть бути закриті, що ускладнює точне прогнозування положення прихованих суглобів. Ця проблема особливо поширена в сценах великого скупчення людей, де кілька людей можуть закривати один одного [9];

- варіації зовнішнього вигляду – оцінювання пози також ускладнюється зміною точки зору. Зовнішній вигляд об'єкта може кардинально змінюватися, якщо дивитися на нього під різними кутами, що може ускладнити точну оцінку пози. Це особливо складно при 3D-оцінці пози, де метою є оцінка 3D-координат суглобів, на які можуть суттєво впливати зміни точки зору [9];

- відсутність анотованих навчальних даних – ефективність багатьох алгоритмів оцінювання

поз, особливо тих, що базуються на глибокому навчанні, залежить від наявності великої кількості анотованих навчальних даних. Однак створення таких наборів даних є тривалим і трудомістким процесом. Відсутність достатньої кількості анотованих навчальних даних може суттєво обмежити продуктивність цих алгоритмів [10];

- обробка в реальному часі – оцінка пози в реальному часі, коли позу потрібно оцінювати в реальному часі під час зйомки відео, створює значні проблеми з точки зору обчислювальних ресурсів і швидкості обробки;

- розмиття руху та якості зображення – при оцінці пози на основі відео, розмиття руху може суттєво вплинути на точність оцінки пози. Швидкі рухи можуть призвести до розмиття зображення, що ускладнює точну ідентифікацію положення суглобів. Аналогічно, низькоякісні зображення або відео, які можуть мати шум або низьку роздільну здатність, також можуть створювати проблеми для точної оцінки пози [10];

- варіації точки зору – оцінювання пози також ускладнюється зміною точки зору. Зовнішній вигляд об'єкта може кардинально змінюватися, якщо дивитися на нього під різними кутами, що може ускладнити точну оцінку пози;

- зміна освітлення – зміна освітлення може кардинально вплинути на зовнішній вигляд об'єкта, що ускладнює точну оцінку пози. Тіні можуть приховувати частини тіла, а сильне освітлення може призвести до переосвітлення ділянок, і обидва ці фактори можуть перешкоджати точному визначенню частин тіла та їхнього положення [11].

#### 4. Огляд наукових робіт в області оцінки пози людини

В сучасних інтелектуальних системах відеоспостереження задача оцінки пози людини (Human Pose Estimation, HPE) відіграє ключову роль у розпізнаванні активності, поведінковому аналізі та безпеці.

Наукові дослідження у цій галузі охоплюють як двовимірну, так і тривимірну оцінку пози, із застосуванням класичних методів, глибокого навчання та гібридних рішень.

##### 4.1 Двовимірна оцінка пози

Розміщення ключових точок у двовимірному просторі відносно кадру зображення або відео можна легко оцінити за допомогою двовимірної оцінки пози. Вона працює шляхом виявлення та аналізу координат  $X$  та  $Y$  суглобів людського тіла на зображенні. 2D оцінка пози – це процес визначення розташування суглобів тіла на зображенні (у піксельних значеннях).

*Традиційні методи оцінки пози людини у 2D* включають такі підходи, як HOG, Edgelet та модель пікторіальних структур (PSM) [12], які представляють частини тіла у вигляді геометричних фігур (наприклад, циліндрів) та моделюють просторові взаємозв'язки між ними. PSM, запропонована Фішлером [13], використовує частини, визначені за піксельною площею та напрямком, і може ефективно оброблятися за допомогою динамічного програмування

*Методи оцінки пози на базі глибинного навчання.* Традиційні методи оцінки пози людини в 2D мають обмежену виразність, не враховують глобальний контекст та базуються на ручних ознаках, що знижує точність та ефективність. Через ці обмеження набули популярності моделі на основі глибокого навчання, які забезпечують кращу точність і дозволяють працювати як з однією, так і з кількома людьми на зображенні.

*Методи оцінки пози однієї людини (SPPE).* Методи оцінки пози однієї людини визначають позу конкретної людини на зображенні. Якщо на зображенні є кілька людей, то зображення обрізається таким чином, щоб на ньому залишилася тільки одна людина. Детектор верхньої частини тіла [14] або детектор всього тіла [15] може виконати це завдання автоматично. Метою методів для однієї людини є визначення місцезнаходження ключових точок у цій області на основі заданої інформації про позицію. Залежно від того, як вони прогнозують ключові точки, методи SPPE поділяються на дві категорії: підходи на основі регресії ключових точок і підходи на основі теплових карт:

– методи на основі регресії ключових точок напряму прогнозують координати кожної точки, але ця задача є складною через необхідність точної відповідності ознак. Для покращення точності використовуються моделі з зворотним зв'язком, наприклад, Iterative Feedback, LCR Network або каскадні регресори [16];

– методи на основі теплових карт прогнозують ймовірність наявності ключової точки в кожному пікселі. Цей підхід дозволяє краще локалізувати частини тіла. Відомі моделі – Convolutional Pose Machines, Stacked Hourglass Network, а також новітні методи SAHR і WAHR, які адаптуються до масштабу і ваг пікселів, значно підвищуючи точність [17]. Також використовуються графові моделі для врахування зв'язків між частинами тіла.

– Пряме регресування координат суглобів є нелінійним і складним для навчання, а також не підходить для випадків з кількома людьми. Водночас теплові карти краще передають просторо-

вий контекст і підходять для складних сценаріїв. Пряме регресування просте, швидке та може застосовуватись у 3D. Теплові карти в поєднанні з великими згортковими ядрами та глибокими моделями покращують точність за рахунок ширшого контексту. У процесі навчання модель поступово пригнічує помилкові відповіді та посилює правильні. Отже, обидва підходи мають свої переваги та недоліки, і універсального рішення не існує.

*Методи оцінки пози декількох людей (MPPE).* Оскільки положення та об'єм людей на зображенні є невизначеними, оцінка пози кількох людей є складнішою, ніж оцінка пози однієї людини. У більшості випадків цю проблему можна вирішити одним із двох способів:

– найпростіший метод полягає в тому, щоб почати з виявлення людини, потім оцінити її частини і, нарешті, обчислити позу для кожної особи. Він забезпечує високу точність завдяки поетапній обробці. Сучасні моделі, наприклад, Mask R-CNN, GlobalNet і двоетапна модель Papandreou, покращують результати за рахунок багаторівневих ознак і сегментації. Застосування ToF-зображень та виділення ROI підвищує точність для складних областей [18]. Цей підхід називається підходом «зверху-вниз» (top-down);

– інший метод полягає в ідентифікації всіх частин на зображенні (тобто частин кожної людини), а потім групуванні частин, які належать різним людям. Це називається висхідним підходом (bottom-up). Моделі, наприклад, PRN та DeeperCut, покращують точність завдяки глибшим мережам і контекстним зв'язкам [19], а підхід, представлений в роботі [20], поєднує оцінку пози з відстеженням, підвищуючи ефективність.

Підхід «зверху-вниз» забезпечує вищу точність завдяки обробці кожної людини окремо, але він повільніший, оскільки вимагає повторного оцінювання пози для кожного виявленого об'єкта. Висхідний підхід швидший, оскільки обробляє всіх людей одночасно, але часто поступається в точності через нижчу роздільну здатність окремих осіб і складність у виділенні деталей. Глибокі нейронні мережі застосовуються для обох підходів, однак неможливо однозначно сказати, який з них кращий – усе залежить від завдання. Вибір між ними базується на компромісі між точністю та швидкістю.

## 4.2 Тривимірна оцінка пози

3D оцінка пози (3D HPE) визначає положення суглобів людини у тривимірному просторі  $(X, Y, Z)$  за зображенням або відео. Основна мета – обчислити координати ключових точок тіла на

основі RGB-зображення. На відміну від 2D, 3D оцінка є складнішою через неоднозначність, вищі вимоги до обчислювальних ресурсів і вплив зовнішніх факторів (текстура, колір шкіри, тло, оклюзії тощо). Оцінювання також ускладнюється вибором якісного датасету (набору даних). Після визначення суглобів моделі аналізують рух людини у серії кадрів.

*Класичні підходи до 3D оцінки пози* включають розширення пікторіальних структурних моделей (PSM), які застосовуються як для однієї, так і для кількох осіб [21]. Для покращення точності використовуються структуровані SVM, що навчаються на відповідності між сегментаційними ознаками та положенням суглобів [22]. Інший підхід – використання HOG-ознак і лінійної регресії для оцінки 3D пози, з подальшим зменшенням розмірності за допомогою PCA [23]. Цей метод показав високі результати, здобувши перше місце у COCO 2016 keypoints challenge та перевершивши попередній рекорд на датасеті MPII.

*Монокулярна 3D оцінка пози людини* є складним завданням через неоднозначність глибини та оклюзії. Попри це, монокулярна камера є найбільш поширеним засобом для НРЕ. Методи на основі глибокого навчання поділяються на однокамерні (single-view) та багатоканерні (multi-view) [24]. Single-view підходи працюють із зображеннями з однієї камери, наприклад EriPolarPose використовує лише 2D ключові точки та епіполярну геометрію для побудови 3D без необхідності у 3D анотаціях. Багатоканерні методи покращують оцінку глибини та точність, навіть із несинхронізованими відео потоками. Найпоширеніший підхід – спершу визначати 2D ключові точки, а потім трансформувати їх у 3D. Такі моделі, як PostNet, HRNet, Mask R-CNN та Cascaded Pyramid Network, забезпечують хорошу точність і швидкість роботи в реальному часі [25].

*Оцінка 3D пози однієї людини.* Більшість робіт для оцінки пози людини використовують одне зображення/відео. Незважаючи на неоднозначність виміру глибини, моделі, навчені на 3D-еталонних даних, показують досить хороші результати для випадку однієї людини без оклюзій.

*Оцінка 3D-позиції кількох людей.* Основною проблемою при оцінці 3D-позиції декількох осіб є оклюзії. Через обмежену кількість відповідних наборів даних прогрес в оцінці 3D-позиції декількох осіб є обмеженим. Крім того, на жаль, майже не існує анотованих наборів даних 3D-позицій кількох людей, подібних до набору даних Human3.6 [26]. Більшість наборів даних з кількома особами або не мають хороших еталон-

них даних, або не є реалістичними. Однією з відомих робіт в даній області є робота [27], в якій для оцінки 3D-позицій кількох людей використовується PandaNet (Pose Estimation and Detection Anchor-based Network).

## 5. Тенденції та перспективи задачі оцінки пози людини

Тенденції задачі оцінки пози людини лежать в площині підходів глибокого навчання, оскільки можна помітити, що ці методи глибокого навчання досягають кращої продуктивності порівняно з іншими сучасними підходами. Успіх підходів глибокого навчання до задачі НРЕ полягає в доступності величезної кількості даних, що є одним з обмежень застосування глибокого навчання. Незважаючи на те, що для об'єктивної оцінки НРЕ були створені різні бази даних, додаткові набори даних з адекватними методологіями обстеження все ще бажані. У довгостроковій перспективі можна використовувати додаткові датчики тіла для запису необроблених даних з різних поз [28].

У той час як задача двовимірної оцінки пози людини досягла достатнього рівня точності, тривимірна оцінка потребує багатьох зусиль, якщо не буде розроблено більш збалансованих моделей, особливо для інтерпретації з одного зображення і без деталей глибини.

Перспективи задачі оцінки пози людини є величезними, оскільки задача має велику сферу застосування, яка важлива в нашому повсякденному житті. Існує також можливість досягти хороших результатів на наборах даних вищої розмірності (вище 2D/3D), таких як оцінка 6D-поз, яка оцінює положення і напрямок 6D-поз. Ці пози корисні в робототехнічних додатках. Незважаючи на те, що ідентифікації людських поз з відео або фотографій присвячено багато зусиль, існує значний розрив між теоретичними дослідженнями і реальними застосуваннями [29].

## Висновки

В статті представлено систематизований огляд сучасних методів оцінки пози людини в інтелектуальних системах відеоспостереження. Розглянуто двовимірні (2D) та тривимірні (3D) підходи, зокрема як класичні алгоритми на основі ручних ознак, так і сучасні глибокі моделі. 2D оцінка залишається домінуючою у відеоспостереженні завдяки швидкодії та простоті реалізації, тоді як 3D оцінка забезпечує глибшу просторову інтерпретацію, але вимагає складніших моделей та апаратних ресурсів.

Проаналізовано top-down і bottom-up підходи до оцінки пози кількох осіб. Top-down забез-

печує вищу точність, однак є повільнішим і менш масштабованим. Bottom-up дозволяє працювати з великою кількістю об'єктів одночасно, хоча поступається у точності. Методи на основі глибокого навчання, особливо ті, що використовують теплові карти й графові структури, демонструють високу ефективність, однак залежать від наявності якісних і репрезентативних навчальних даних.

Основні виклики у практичному застосуванні НРЕ пов'язані з перекриттям об'єктів, зміною освітлення, тінями, шумом, низькою якістю відео та вимогами до реального часу. Подолання цих проблем потребує стійких, адаптивних моделей та використання додаткових сенсорів. Перспективи подальших досліджень охоплюють багатомодальні підходи, 6D оцінку пози та розвиток самонавчальних систем, здатних адаптуватися до змінних умов реального середовища. Таким чином, оцінка пози людини залишається ключовим напрямом у розвитку інтелектуального відеоаналізу.

### Список використаної літератури

#### References

1. C. Zheng, W. Wu, C. Chen, T. Yang, S. Zhu, J. Shen, N. Kehtarnavaz, and M. Shah, "Deep Learning-based Human Pose Estimation: A Survey," *ACM Computing Surveys*, vol. 56, no. 1, Art. no. 11, pp. 1–37, Jan. 2024. DOI: 10.1145/3603618.
2. S. Dubey and M. Dixit, "A comprehensive survey on human pose estimation approaches," *Multimedia Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 167–195, Feb. 2023. DOI: 10.1007/s00530-022-00980-0.
3. Z. Sun, Q. Ke, H. Rahmani, M. Bennamoun, G. Wang, and J. Liu, "Human Action Recognition From Various Data Modalities: A Review," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 45, no. 3, pp. 3200–3225, Mar. 2023. DOI: 10.1109/TPAMI.2022.3183112.
4. M. Cormier, A. Clepe, A. Specker, and J. Beyerer, "Where are we with Human Pose Estimation in Real-World Surveillance?," in *Proc. IEEE/CVF Winter Conf. Appl. Comput. Vis. Workshops (WACVW)*, Waikoloa, HI, USA, 2022, pp. 591–601. DOI: 10.1109/WACVW54805.2022.00065
5. M. Andriluka, L. Pishchulin, P. Gehler, and B. Schiele, "2D Human Pose Estimation: New Benchmark and State of the Art Analysis," in *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Columbus, OH, USA, 2014, pp. 3686–3693. DOI: 10.1109/CVPR.2014.471.
6. R. Choudhury, K. M. Kitani, and L. A. Jeni, "TEMPO: Efficient Multi-View Pose Estimation, Tracking, and Forecasting," in *Proc. of the 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Paris, France, 2023, pp. 14704–14714.
7. J. Rajasegaran, G. Pavlakos, A. Kanazawa, C. Feichtenhofer, and J. Malik, "On the Benefits of 3D Pose and Tracking for Human Action Recognition," *arXiv preprint arXiv:2304.01199*, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2304.01199>
8. T. L. Munea, Y. Z. Jembre, H. T. Weldegebriel, L. Chen, C. Huang, and C. Yang, "The Progress of Human Pose Estimation: A Survey and Taxonomy of Models Applied in 2D Human Pose Estimation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 133330–133348, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010248
9. C. Zheng, W. Wu, C. Chen, T. Yang, S. Zhu, J. Shen, N. Kehtarnavaz, and M. Shah, "Deep Learning-Based Human Pose Estimation: A Survey," *arXiv preprint arXiv:2012.13392*, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2012.13392>
10. R. W. Poppe, "A survey on vision-based human action recognition," *Image and Vision Computing*, vol. 28, no. 6, pp. 976–990, Jun. 2010. DOI: 10.1016/j.imavis.2009.11.014
11. M. Wang, J. Tighe, and D. Modolo, "Combining detection and tracking for human pose estimation in videos," *arXiv preprint arXiv:2003.13743*, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2003.13743>
12. P. F. Felzenszwalb and D. P. Huttenlocher, "Pictorial Structures for Object Recognition," *International Journal of Computer Vision*, vol. 61, no. 1, pp. 55–79, Jan. 2005. DOI: 10.1023/B:VISI.0000042934.15159.49
13. M. A. Fischler and R. A. Elschlager, "The Representation and Matching of Pictorial Structures," *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-22, no. 1, pp. 67–92, Jan. 1973. DOI: 10.1109/T-C.1973.223602
14. A. S. Micilotta, E.-J. Ong, and R. Bowden, "Real-time upper body detection and 3D pose estimation in monoscopic images," in *Proc. of the 9th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Graz, Austria, 2006, vol. Part III, pp. 139–150. DOI: 10.1007/11744078\_11
15. S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149, Jun. 2017. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2577031

16. G. Papandreou, T. Zhu, N. Kanazawa, A. Toshev, J. Tompson, C. Bregler, and K. Murphy, "Towards Accurate Multi-person Pose Estimation in the Wild," *arXiv preprint arXiv:1701.01779*, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1701.01779>
17. M. Ben Gamra and M. A. Akhloufi, "A review of deep learning techniques for 2D and 3D human pose estimation," *Image and Vision Computing*, vol. 114, Art. no. 104282, 2021. DOI: 10.1016/j.imavis.2021.104282
18. N. Rodrigues, H. Torres, B. Oliveira, J. Borges, S. Queirós, J. H. Mendes, J. Fonseca, V. Coelho, and J. H. Brito, "Top-Down Human Pose Estimation with Depth Images and Domain Adaptation," in *Proc. of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2019)*, Vol. 5: VISAPP, Prague, Czech Republic, 2019, pp. 281–288. DOI: 10.5220/0007344602810288
19. Y. Chen, Z. Wang, Y. Peng, Z. Zhang, G. Yu, and J. Sun, "Cascaded Pyramid Network for Multi-person Pose Estimation," in *Proc. of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 7103–7112. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00742
20. E. Insafutdinov, L. Pishchulin, B. Andres, M. Andriluka, and B. Schiele, "DeeperCut: A Deeper, Stronger, and Faster Multi-person Pose Estimation Model," in *Computer Vision – ECCV 2016*, B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, and M. Welling, Eds. Cham: Springer, 2016, pp. 34–50. DOI: 10.1007/978-3-319-46466-4\_3
21. A. Alzughabi and Z. Chaczko, "Human detection model using feature extraction method in video frames," in *Proc. of the 2016 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*, Christchurch, New Zealand, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IVCNZ.2016.7804424
22. H. Kim, S. Lee, D. Lee, S. Choi, J. Ju, and H. Myung, "Real-Time Human Pose Estimation and Gesture Recognition from Depth Images Using Superpixels and SVM Classifier," *Sensors*, vol. 15, no. 6, pp. 12410–12427, 2015. DOI: 10.3390/s150612410
23. K. Chen, S. Gong, and T. Xiang, "Human pose estimation using structural support vector machines," in *Proc. of the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, Barcelona, Spain, 2011, pp. 846–851. DOI: 10.1109/ICCVW.2011.6130340
24. A. Zakhor and A. Hallquist, "Single view pose estimation of mobile devices in urban environments," in *Proc. of the 2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, Clearwater Beach, FL, USA, 2013, pp. 347–354. DOI: 10.1109/WACV.2013.6475039
25. Y. Deng, C. Sun, J. Zhu, and Y. Sun, "SVMAC: Unsupervised 3D Human Pose Estimation from a Single Image with Single-view-multi-angle Consistency," *arXiv preprint arXiv:2106.05616*, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2106.05616>
26. C. Ionescu, D. Papava, V. Olaru, and C. Sminchisescu, "Human3.6M: Large Scale Datasets and Predictive Methods for 3D Human Sensing in Natural Environments," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 36, no. 7, pp. 1325–1339, Jul. 2014. DOI: 10.1109/TPAMI.2013.248
27. A. Benzine, F. Chabot, B. Luvison, Q. C. Pham, and C. Achard, "PandaNet: Anchor-Based Single-Shot Multi-Person 3D Pose Estimation," *arXiv preprint arXiv:2101.02471*, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2101.02471>
28. K. Khan, W. Albattah, R. U. Khan, A. M. Qamar, and D. Nayab, "Advances and Trends in Real Time Visual Crowd Analysis," *Sensors*, vol. 20, no. 18, Art. no. 5073, 2020. DOI: 10.3390/s20185073
29. S. Chang, L. Yuan, X. Nie, Z. Huang, Y. Zhou, Y. Chen, J. Feng, and S. Yan, "Towards Accurate Human Pose Estimation in Videos of Crowded Scenes," in *Proc. of the 28th ACM International Conference on Multimedia (MM '20)*, Seattle, WA, USA, 2020, pp. 4630–4634. DOI: 10.1145/3394171.3416299

## Human posture estimation in intelligent video surveillance systems: modern approaches and challenges

R. Kovalevych, D. Kurinko, V. Kryvda  
Odesa Polytechnic National University

**Abstract.** The article presents an overview of modern methods for estimating human pose in intelligent video surveillance systems. 2D and 3D approaches are considered, including both classical methods and models based on deep learning. The features of top-down and bottom-up strategies, their advantages and

*limitations are analyzed. The main challenges associated with real-world surveillance conditions, such as occlusions, lighting changes, and limited image quality, are identified. Prospects for the development of the industry, including the use of 6D pose estimation, multisensory data, and self-learning models, are outlined.*

**Keywords:** *Intelligent systems, Video surveillance, Behavioral analysis, Pose estimation, Neural networks, Heatmaps, Multi-camera systems, Occlusions.*

Отримано: 20.02.2025

### Про авторів



**Ковалевич Роман Валерійович**, аспірант кафедри штучного інтелекту та аналізу даних, Національний університет «Одеська Політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: 8766639@as.op.edu.ua

**Roman V. Kovalevych**, postgraduate student of the Artificial Intelligence and Data Analysis Department, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: 8766639@as.op.edu.ua

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-9645-4352>



**Курінько Дмитро Дмитрович**, аспірант кафедри штучного інтелекту та аналізу даних, Національний університет «Одеська Політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: dmitrykurinko@gmail.com

**Dmytro D. Kurinko**, postgraduate student of the Artificial Intelligence and Data Analysis Department, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: dmitrykurinko@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8304-3257>



**Кривда Вікторія Ігорівна**, к. т. н., доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, завідувач відділу аспірантури і докторантури, Національний університет «Одеська Політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: kryvda@op.edu.ua; тел.: +38 066 930 0875

**Viktoriia I. Kryvda**, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Supply and Energy Management, Head of the Department of Postgraduate and Doctoral Studies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: kryvda@op.edu.ua; ph: +38 066 930 0875

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0930-1163>

## Comparison of mathematical models of power generation equipment in transient process simulation in energy systems

K. V. Beglov, V. I. Kryvda, O. A. Klymchuk, V. R. Zhukovkyi, O. V. Yavorsky, G. Io. Galanter

*Odesa Polytechnic National University*

**Abstract.** *The aim of this study is to develop approaches for improving the efficiency of transient characteristic modeling of a nuclear power plant (NPP) unit by approximating dynamic processes using first- and second-order functions. This will reduce the simulation time for combined energy systems, which include power generation sources with different physical operating principles (NPPs, thermal power plants, hydroelectric power plants, wind farms, etc.). This work is aimed at ensuring the selection of a simulation model of equipment that best meets the goals of future research, including the development of new approaches to controlling the structure and parameters of power generating sources, which will contribute to the efficient operation of power systems.*

**Keywords:** *automatic control system, identification, classification, efficiency criteria, mathematical model.*

### Introduction

In energy systems, accurate modeling of transient processes is crucial for ensuring system stability and reliability. One of the key aspects of such modeling is representing power generation equipment using mathematical models. Different types of equipment, such as synchronous generators, wind turbines, and solar panels, require specific models to capture their dynamic behavior during transient processes.

When comparing mathematical models of power generation equipment, it is important to consider factors such as accuracy, computational efficiency, and ease of implementation. For example, detailed physical models can provide a high level of accuracy but may be computationally intensive, making them less practical for real-time simulations. On the other hand, simplified empirical models may offer faster computation times but can compromise accuracy under certain operating conditions.

Thus, the selection of mathematical models for power generation equipment in energy system simulations is a critical decision that can impact the accuracy and reliability of transient process modeling. By carefully evaluating the trade-offs between accuracy and computational efficiency, researchers and engineers can choose the most suitable model for their specific application.

The research object is a simulation model of a

nuclear power plant unit. This study addresses the problem of adequately describing and analyzing transient processes in models of thermal and electrical equipment to improve power management methods and energy system stability. The primary objective is to approximate the dynamic characteristics of a nuclear power plant unit using first-, second-, and third-order differential equations, which allows for optimization of the control process and ensures accurate system dynamics representation. This will contribute to enhancing the efficiency of power plants, ensuring stable electricity supply to consumers, and improving methods for analyzing reactor system performance.

The study includes a simulation of a nuclear power plant unit at various load levels, allowing an investigation into how the order of the differential equation describing the dynamic properties of the control object affects the quality of power generation/consumption balance maintenance in the energy system. The obtained results indicate that first-order equations provide a fast and simplified system analysis; however, such models are unsuitable for describing certain operating modes of the equipment, such as short-circuit conditions in the electrical grid. For emergency conditions, high-order nonlinear models must be used. This paper considers only transient processes corresponding to the normal operation of energy systems.

During the study, the effectiveness of approximation was evaluated by comparing the actual reactor characteristics with simulation results. Criteria for assessing approximation accuracy were

---

© Beglov K. V., Kryvda V. I., Klymchuk O. A., Zhukovkyi V. R., Yavorsky O. V., Galanter G. Io., 2025

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

developed, considering indicators such as system response speed, regulation stability, and model consistency with real data. The research results indicate that at high power levels, second-order functions provide a more accurate representation of dynamic processes, while for medium and low power levels, first-order functions are more effective.

The obtained research results can be applied to optimize the power regulation process in energy systems, improve the accuracy of modeling the dynamics of power plants, and enhance energy system management strategies. The use of first- and second-order function approximations allows for a balance between analysis speed and system description accuracy, which is essential for ensuring the reliability and efficiency of power plants under modern conditions.

Objectives for achieving the research goal:

- Obtain NPP unit acceleration curves for the "setpoint – electrical power" channel at different load levels.
- Compare the accuracy of approximation using first- and second-order functions.
- Develop criteria for evaluating approximation efficiency to determine the optimal power regulation method.
- Provide recommendations for using first- and second-order functions in reactor system modeling.

These objectives aim to ensure the selection of a simulation model that best meets the needs of future research, including the development of new approaches to managing the structure and parameters of power generation sources, thereby contributing to the efficient operation of energy systems.

### 1. Statement of the problem

One of the key tasks in analyzing the stability, reliability, and efficiency of modern energy systems is their adequate simulation modeling. In this context, understanding the principles of building such models, their accuracy, and efficiency in representing the system's dynamic behavior under external or internal disturbances is crucial.

Mathematical models of power generation equipment are developed to represent the processes of electricity generation, transmission, and distribution while considering the physical, chemical, and mechanical properties of the equipment. The most common models include synchronous generators, asynchronous machines, renewable energy sources, energy storage systems, and other energy system elements. Each model is tailored to a specific level

of detail and the problem it aims to solve. For example, models of synchronous generators are typically based on equations of electromagnetic induction, rotor dynamics, and control systems [1].

Transient processes in the power system, such as short circuits, load changes, or reserve activation, require high modeling accuracy to adequately predict their consequences. Both simplified linear models, which allow for a quick assessment of system behavior under minor disturbances, and nonlinear models, which account for complex interdependencies among system elements, are used for this purpose. Nonlinear models, such as state equations that consider magnetic circuit saturation, enable highly accurate process modeling but require more computational resources [2].

The increasing demand for energy-intensive equipment and the uneven energy consumption throughout the day necessitate more precise power regulation methods that consider the dynamic changes in reactor system parameters. Additionally, modern energy systems face challenges related to equipment aging, which limits their ability to respond quickly to load changes. Insufficient model accuracy or incorrect approximation methods can lead to power regulation errors, oscillations, and, in some cases, emergency situations in the power system. Therefore, selecting an appropriate model is crucial for ensuring the stability of the energy system's operation.

Model comparisons are conducted based on several key criteria: accuracy in representing physical processes, computation speed, versatility (i.e., the ability to model various scenarios), and compatibility with other energy system models. For example, models of electrical equipment, such as transformers and power transmission lines, need to account for transient oscillatory processes caused by the simultaneous presence of inductive and capacitive properties. On the other hand, the large masses of metal, water, and technological limitations on the rate of power changes in power units act as low-pass filters for these transient processes, complicating the overall model [3].

Another aspect of model comparison is their ability to work with real-world data. Energy systems increasingly use machine learning-based models to analyze real-time data, such as load indicators, voltage, or frequency. At the same time, classical physics-based models remain relevant due to their transparency and the ability to conduct precise engineering analyses [4].

### 2. Materials and Methods

### 2.1. Application Areas of First- and Second-Order Mathematical Models

In the field of energy systems, the use of simulation models is crucial for understanding and predicting the behavior of complex systems. One common approach is to model these systems using differential equations of various orders. By comparing simulation models based on differential equations of different orders, researchers can gain valuable insights into the dynamics of energy systems. [5]

Higher-order differential equations allow for a more detailed representation of system dynamics, accounting for nuances that might be overlooked in lower-order models. However, these models can be more computationally intensive and may require more data for accurate parameter estimation. On the other hand, lower-order differential equations provide a more simplified representation of the system, making them easier to analyze and implement. Although they may not capture certain complexities, they can still offer valuable information about the overall behavior of the energy system. By comparing simulation models based on differential equations of different orders, it is possible to determine the most suitable approach for a specific application. [6] This comparative analysis is essential for deepening the understanding of energy system operations and improving the accuracy of predictive models.

First-order models are widely used for rapid and simplified system response analysis. They describe the transient process using a transfer function of the form:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1},$$

where  $K$  - is the gain coefficient, and  $T$  - is the system time constant. These models are quite effective for describing systems with homogeneous dynamic characteristics; however, their accuracy may decrease when modeling complex or multifactorial processes. They are applied when the system dynamics are characterized by:

1. A single dominant storage element (e.g., boiler water temperature or steam pressure).
2. The absence of significant oscillatory processes.
3. An exponential transient process without oscillations.

Advantages of First-Order Models:

- Simplicity of calculations.
- Useful for rough system estimation when precise behavior is not critical.

- Suitable for stable, slow-changing processes [7].

A system described by a first-order differential equation under random disturbances has the following characteristic features:

#### 1. Application area:

- Suitable when the system dynamics under random disturbances are determined by a single dominant storage process, such as the thermal inertia of a boiler.

- A weak influence of random disturbances on system parameters (up to 10%) allows neglecting the interaction of complex processes.

#### 2. Stability:

- A first-order system is always stable if the time constant  $T > 0$ .

- Small-amplitude random disturbances decay rapidly according to an exponential law.

#### 3. Frequency Response:

- A first-order system exhibits low-pass filtering properties: disturbances with frequencies higher than  $1/T$  are effectively attenuated (their amplitude decreases), while low-frequency disturbances pass almost unchanged.

- Frequency response:

$$|H(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 1}}.$$

Second-order models provide a more accurate description of reactor system dynamics by considering a greater number of parameters. They use a transfer function of the form:

$$W(s) = \frac{K}{T_2^2 + T_1 s + 1}, \quad (1)$$

where  $T_1$  and  $T_2$  are time constants characterizing different aspects of the system dynamics [8]. If the condition  $T_1 < 2T_2$  is met, the system exhibits oscillatory properties; otherwise, it behaves as an inertial second-order system. For convenience in analyzing the properties of an oscillatory system, its transfer function is rewritten in the form:

$$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1}.$$

The parameter  $\zeta$  is called the damping coefficient. If  $\zeta > 0$ , the system behaves as an inertial system [9].

By incorporating second-order dynamics, these models are better suited for analyzing complex transient processes, though they require more

computational resources. Second-order models are used when the system exhibits:

- The presence of two interacting storage elements.
- Oscillatory dynamics or damped transient processes.
- A significant influence of the damping coefficient  $\zeta$  on the nature of the transient process.

Advantages of Second-Order Models:

- Accounts for complex dynamic processes.
- Suitable for systems with oscillations or inertia.
- Provides a more accurate model for control optimization.

A system described by a second-order differential equation under random disturbances has the following characteristic features:

1. Application:

- Used when the system has two interrelated dynamic variables (e.g., pressure and turbine rotational speed).

- Important in the presence of interactions between accumulation processes or when oscillatory dynamics are present.

2. Stability:

- Stability depends on the damping coefficient  $\zeta$  and the signs of the roots of the characteristic equation.

- When  $0 < \zeta < 1$ , the system exhibits damped oscillations, which may be amplified under random disturbances (resonance effect) [10].

3. Transient process:

- If the condition  $0 < \zeta \ll 1$  holds, the system exhibits damped oscillations; if  $\zeta = 0$ , oscillations do not decay; when  $\zeta > 1$ , oscillations are absent.

- In the presence of random disturbances, a second-order system may experience frequency resonances if the disturbance matches the natural frequency  $\omega_n$ .

4. Frequency characteristics:

- A second-order model filters random disturbances more effectively depending on damping.

Table 1

Comparison of First- and Second-Order System Properties

Characteristic	First Order	Second Order
System Complexity	One dominant process	Two interrelated processes
Oscillations	None	Presence of oscillations depends on system parameters and external influences
Control Objectives	Maintaining slowly varying parameters	Controlling processes with inertia or oscillations
Examples of Technological Equipment	Steam pressure after a boiler, steam temperature	Turbine rotational speed, power converters

Table 2

Comparison of First- and Second-Order Transfer Function Criteria

Criterion	First-Order Transfer Function	Second-Order Transfer Function
Stability	Always stable ( $T > 0, T > 0$ )	Depends on the ratio between coefficients $T_1$ and $T_2$ (damping coefficient $\zeta$ ). Resonance is possible.
Noise Sensitivity	Suppresses high-frequency random disturbances	May amplify noise at frequencies close to the resonance frequency
Frequency Filtering	Suitable for low-frequency disturbances	Suitable for tasks with resonances and a broad frequency spectrum
Transient Response	Exponential	Damped oscillations or critical damping ( $\zeta = 1$ )
Application	Systems with a single accumulation process (e.g., thermal inertia)	Systems with two interacting processes (e.g., pressure and velocity)
Effectiveness with Random Disturbances	Effectively suppresses small-amplitude noise (<10%)	Requires consideration of resonance frequencies when filtering random disturbances



### 3. Measurement Module:

- Records the reactor's output power (as a percentage of the nominal value).
- Monitors other system characteristics, such as settling time, maximum deviations, and operational stability.

The model was built considering real operating conditions of reactors, with its parameters adjusted to match the typical characteristics of reactor systems.

For the study, load levels ranging from 80% to 100% of nominal power were selected, allowing for an assessment of system behavior across a wide range of operating modes. The simulation time was set to 24 hours to account for both short-term fluctuations and long-term dynamic changes.

To ensure adequate modeling, the following aspects were considered:

1. The system's response to a sudden increase or decrease in load.
2. The system's ability to stabilize after external disturbances.
3. The settling time required to reach the specified power level after changes in the system.

The model also includes the capability to simulate external disturbances, such as sudden load changes. This enables the study of the system's response under real operating conditions. Special

attention is given to how the system reacts to these disturbances, how quickly the power stabilizes, and how accurately the model represents the reactor's dynamic processes.

Due to its structure and capabilities, the Simulink model serves as a powerful tool for studying transient processes in a reactor system. To run the reactor simulation in Simulink, multiple power levels were defined using the Zpow block. These levels range from 80% to 100% of nominal power, allowing for an assessment of system behavior under different load conditions. Each level is set as an input signal that simulates real-world operational conditions of the energy system.

The simulation time is set to 24 hours to enable the analysis of both short-term fluctuations and long-term power variations. During the simulation, the output parameter  $N_{el}$  (electrical power) is recorded as a function of time, allowing for the evaluation of the system's dynamic characteristics. After running simulations for each power level, the results are analyzed to construct transient response characteristics of  $N_{el}$  over time. These graphs form the basis for approximating dynamic processes using transfer functions.

Fig. 2 illustrates the transient response corresponding to a step change in load from 100% to 80%, both in the direction of decrease and increase.

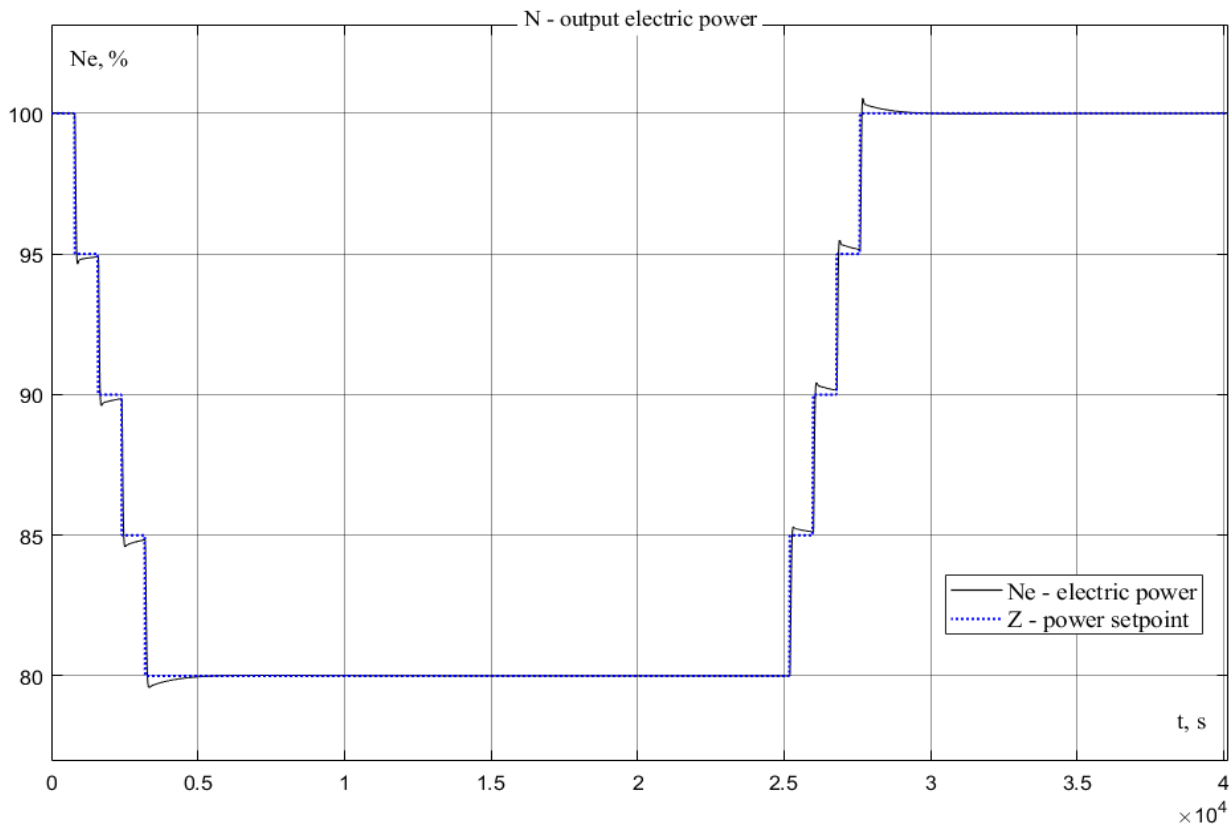


Fig. 2. The process of changing the power unit capacity depending on the task

For the approximation procedure, the given process was divided into separate segments, which were approximated using first-order transfer functions, second-order transfer functions without delay, second-order transfer functions with delay, and third-order transfer functions.

The simulation and approximation results are presented in Fig. 3 and Fig. 4. A summary of the comparison results is provided in Table 3.

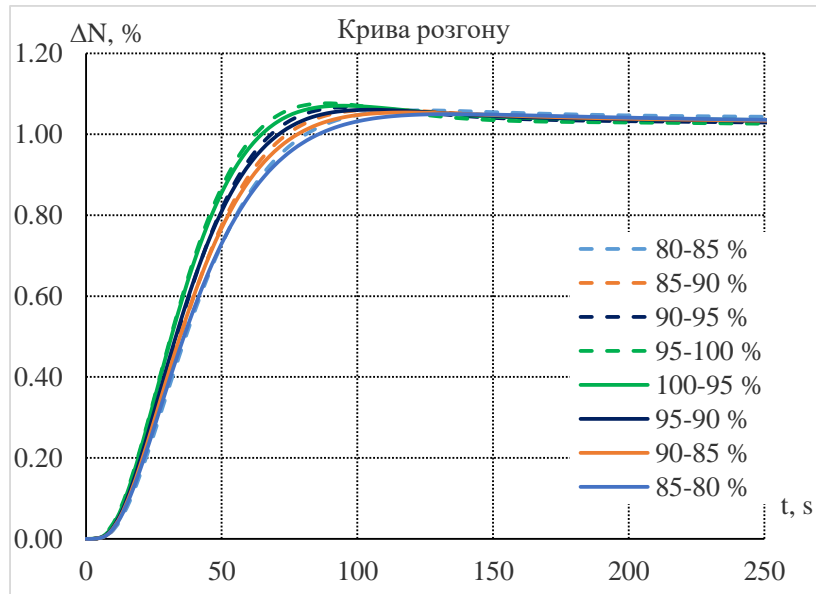


Fig. 3. Step response of a NPP power unit when changing the load controller task at  $\Delta Z_{Ne} = \pm 5\%$  for different load levels

As can be seen from the acceleration curve graphs, even when the load regulator is in operation, the power unit, as a power control object, has nonlinear properties depending on the load level at which the disturbance occurs. However, the presence of an automated power unit control system allows us to minimize these nonlinearities.

All eight acceleration curves were approximated by four types of models: 1st-order inertial link

with delay, 2nd-order inertial link without delay, 2nd-order inertial link with delay, and 3rd-order inertial link without delay. The results of the approximation are shown in Fig. 4 and Fig. 5 and summed up in Table 3.

Depending on the power, the time constant of the approximated model ranges from 18 s at maximum load to 30 s at minimum load. This dependence is shown in Fig. 4.

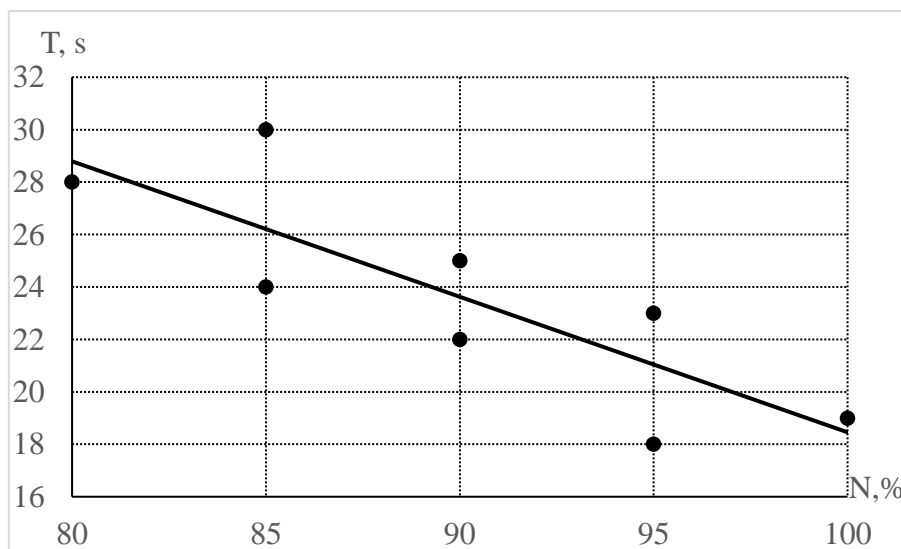


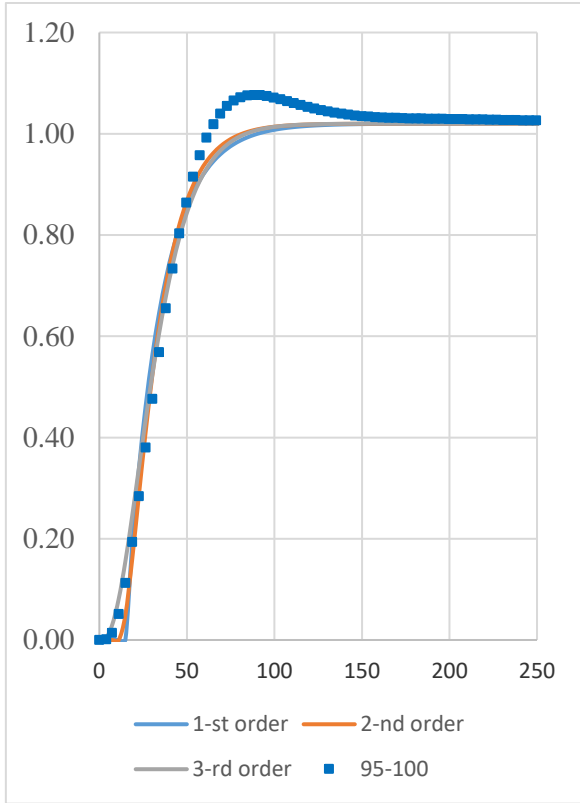
Fig. 4. Dependence of the time constant of the approximated model on the power level

Fig. 5 shows two extreme cases, the worst and the best, of the acceleration curves. In the worst case, even a second-order model describes the properties of the control object with a large error. In the best case, the 1st order model describes the properties with sufficient accuracy. In this case, the difference between the models is observed only in the initial part of the graph. Later on, the graphs practically coincide.

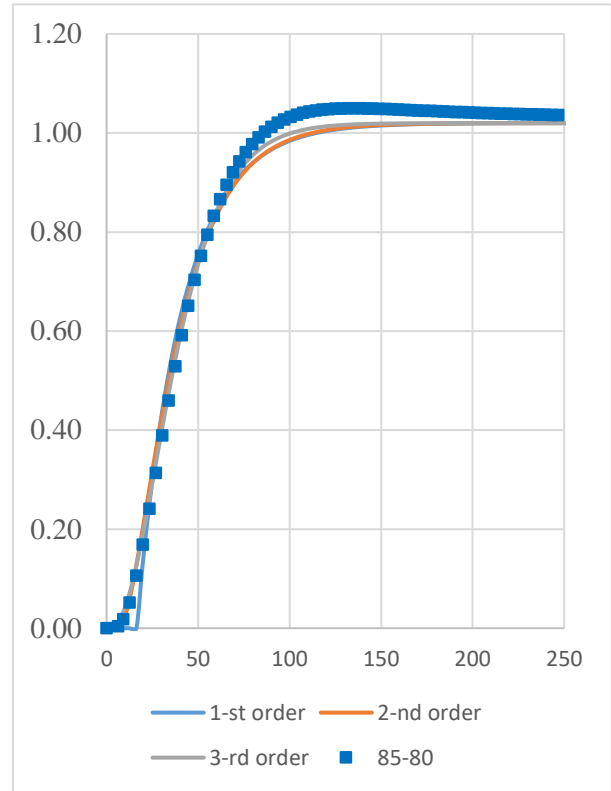
The approximation models are compared with each other using the sum of squared deviations between the simulation model and the approximation model:

$$S = \sum (y - y_m)^2 .$$

Table 3 shows the numerical values of the sum. The number of the acceleration curve corresponds to the number of the graph in Fig. 3.



a)



b)

Fig. 5. The result of approximation of the worst (a) and best (b) step response of a NPP power unit

Table 3

Comparison of Approximation Results for the Power Unit step responses

Ramp Response Curve Number	Sum of Squared Deviations S			
	First-Order Model with Transport Delay	Second-Order Model without Transport Delay	Second-Order Model with Transport Delay	Third-Order Model
1	0,144	0,193	0,109	0,081
2	0,140	0,194	0,089	0,085
3	0,144	0,183	0,087	0,074
4	0,104	0,145	0,079	0,052
5	0,107	0,160	0,063	0,052
6	0,110	0,176	0,070	0,067
7	0,130	0,217	0,097	0,097
8	0,152	0,226	0,104	0,112

This table summarizes the approximation accuracy for different transfer function models by evaluating the sum of squared deviations for each ramp-up curve. As expected, the best result in terms of approximation accuracy is obtained with the 3rd order model. On the other hand, it turned out that the 2nd order model without delay describes the object even worse than the first order model with delay. In addition, in the worst case (curve 8), the 2nd order model approximation was more accurate than the 3rd order model. Based on the calculation results and the practice of calculating industrial regulators, we can conclude that there is no significant difference between the 1st, 2nd, and 3rd order models considered. That is, the decision on the structure and order of the model should be made based on the degree of detail of the system being modeled.

### Conclusion

In the modeling of regulation processes in thermal and electrical power systems, the choice between first-order and second-order differential equations plays a significant role. First-order differential equations describe systems where the rate of change of the state depends only on the current state and external influences. These equations are relatively simple and allow for analytical solutions, which facilitates the analysis and synthesis of control systems. Such models are particularly useful in the early stages of design when there is a need for a quick evaluation of the system's basic dynamic properties and preliminary calculations. The application of first-order models is also justified when the system's dynamics are straightforward and do not require consideration of inertia or oscillatory processes.

On the other hand, second-order differential equations take into account not only the rate of change of the state but also acceleration, allowing for the modeling of systems with more complex dynamics, including oscillatory processes and inertia effects. These models are necessary for the accurate description of systems where significant delays or oscillations are present, such as in modeling synchronous machines in electrical power engineering. However, the use of second-order equations complicates the mathematical model, requires more complex solution methods, and increases computational costs. Additionally, the identification of parameters for such models may be complicated due to the need for precise experimental data and complex calibration procedures.

In the context of thermal power systems, where processes often exhibit relatively slow dynamics and can be approximated without considering high-

frequency oscillations, first-order models simplify the analysis and development of control systems. This helps reduce development costs and simplifies the implementation of control algorithms. However, when it is necessary to account for more complex dynamic effects, such as resonance phenomena or interactions between different subsystems, the use of second-order models becomes inevitable to ensure the adequacy and accuracy of the modeling.

Thus, the choice between using first-order or second-order differential equations in modeling regulation processes in thermal and electrical power systems depends on the required accuracy, the complexity of the system's dynamics, and the available resources for developing and implementing the models.

### Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest in relation to this study, including financial, personal, authorship or other, which could affect the study and its results presented in this article.

### Financing

The study was conducted without financial support.

### Data availability

The manuscript has no associated data.

### Use of artificial intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies when creating the presented work.

### References

1. Brezovec, M., Kuzle, I. and Krpan, M. (2022) 'Detailed mathematical and simulation model of asynchronous generator', *Journal of Energy - Energija*, 64(1-4), pp. 102-129. <https://doi.org/10.37798/2015641-4147> (PDF).
2. I.A. Razzhivin, A.A. Suvorov, R.A. Ufa, M.V. Andreev, A.B. Askarov, The energy storage mathematical models for simulation and comprehensive analysis of power system dynamics: A review. Part i, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 48, Issue 58, 2023, Pages 22141-22160. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.070>.
3. da Silva, L. T. F. W., Tomim, M. A., Barbosa, P. G., de Almeida, P. M., & da Silva Dias, R. F. (2023). Modeling and Simulating Wind Energy Generation Systems by Means of Co-Simulation Techniques. *Energies*, 16(19), 7013. <https://doi.org/10.3390/en16197013>

4. Xie, Zhijun & Zhang, Dongxia & Hu, Wei & Han, Xiaoqing. (2024). Power System Transient Stability Preventive Control via Aptenodytes Forsteri Optimization with an Improved Transient Stability Assessment Model. *Energies*. 17. 1942. <https://doi.org/10.3390/en17081942>.
5. Yuanshi Zhang, Amin Mohammadpour Shotorbani, Liwei Wang, Behnam Mohammadi-Ivatloo. (2021) Distributed Secondary Control of a Microgrid With a Generalized PI Finite-Time Controller. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy - Vol. 8*
6. M. Nagendra, Ch. Naga Sai Kalyan & R. Srinivasa Rao. Comparison of SMES and RFB Performance in Combined Voltage and Frequency Regulation of Multi Source Power System. *Control Applications in Modern Power Systems (EPREC 2023)* pp 91–107
7. Yavorskyi Oleksandr, Tarakhtii Olha, Maksymov Maksym, Kryvda Viktoriia. A model of a gas turbine unit with concentrated parameters for analyzing patterns of dynamic properties. *Energy Engineering and Control Systems, Volume 9, Number 2, 2023*, p. 105 - 118
8. Yavorskyi, O., Tarakhtii, O., Zhukovskiy, V., Panin, V. (2024). Analysis of the distribution of gas turbine unit operation modes as a tool for improving the stability of the power system. *Technology Audit and Production Reserves*, 6 (2 (80)), 50–57. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.320229>
9. D. Bouskela, “Modeling and simulation of complex ThermoSysPro model with OpenModelica: Dynamic Modeling of a combined cycle power plant,” in *Proc. 12th Int. Modelica Conf.*, Prague, Czech Republic, May 2017, pp. 407–414.
10. Kryvda, V., Maksymov, M., Zubak, V., Ivaneiev, A., Ryaboshapka, R. (2024). Development of the model and improvement of the method of automated control of steam turbine parameters to minimize the power imbalance in the energy system to increase its efficiency. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (1 (79)), 00–00. <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.314219>
11. Kryvda, V. I., Zubak, V. V., Maksymov, M. M. (2024). Model for maintaining the operability of the power system under conditions of its imbalance. *Electrical and Computer Systems*, 40 (116), 13–24. <https://doi.org/10.15276/eltecs.40.116.2024.2>
12. Goldrin V. M., Chervonenko I. I., Zbyskyi V. S., Brodych R. A., Slonevskiy O. G. Participation of Ukrainian NPPs in Frequency and Power Control in the Integrated Power System: Analysis of the Problem and Ways of Solution. "State Enterprise State Scientific and Technical Centre for Nuclear Radiation Safety Nuclear and Radiation Safety 1(85).2020

## Порівняння математичних моделей енергогенеруючого обладнання при моделюванні перехідних процесів в енергосистемах

**К. В. Беглов, В. І. Кривда, О. А. Климчук, В. Р. Жуковський, О. В. Яворський, Г. Й. Галантер**  
*Національний університет «Одеська політехніка»*

**Анотація.** Метою роботи є розробка підходів до підвищення ефективності моделювання перехідних характеристик енергоблоку АЕС шляхом апроксимації динамічних процесів функціями першого і другого порядків. Це дозволить зменшити час моделювання комбінованих енергосистем систем, які складаються у тому числі з енергогенеруючих джерел з різними фізичними принципами роботи (АЕС, ТЕС, ГЕС, ВЕС, тощо). Це дозволить забезпечити надійність та стабільність роботи енергосистеми, а також оптимізувати управління джерелами електричної енергії. Ця робота спрямована на забезпечення вибору такої імітаційної моделі обладнання, яка найбільшою мірою задовольняє меті майбутніх досліджень, у тому числі розробці нових підходів до управління структурою та параметрами енергогенеруючих джерел, що сприятиме ефективному функціонуванню енергетичних систем.

**Ключові слова:** система автоматичного керування, ідентифікація, класифікація, критерії ефективності, математична модель.

Отримано 18.02.2025

### About the authors



**Konstantin V. Beglov**, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko ave., Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: beglov.kv@op.edu.ua; ph.: +380 97 919 0734

**Беглов Костянтин Вячеславович**, *Corresponding author*, к. т. н., доцент, доцент кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: beglov.kv@op.edu.ua; тел.: +380 97 919 0734

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5277-2577>



**Victoria I. Kryvda**, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Supply and Energy Management, Head of Department of Postgraduate and Doctoral Studies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: kryvda@op.edu.ua; ph: +38 066 930 0875

**Кривда Вікторія Ігорівна**, к. т. н., доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, завідувач відділу аспірантури і докторантури, Національний університет «Одеська Політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: kryvda@op.edu.ua; тел.: +38 066 930 0875

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0930-1163>



**Oleksandr A. Klymchuk**, Dr. of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Thermal Power Plants and Energy-Saving Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: klymchuk@op.edu.ua, ph.: +380 68 192 9019

**Климчук Олександр Андрійович**, д. т. н., професор, професор кафедри теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: klymchuk@op.edu.ua; тел.: +380 68 192 9019

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5207-7259>



**Vladyslav R. Zhukovskiy**, postgraduate student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko ave., Odesa, Ukraine, 65044. E-mail: zhukovskiy.8971899@stud.op.edu.ua; ph.: +38 067 718 3545

**Жуковський Владислав Русланович**, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: zhukovskiy.8971899@stud.op.edu.ua; тел.: +38 067 718 3545

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-5479-5278>



**Oleksandr V. Yavorskiy**, postgraduate student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko ave., Odesa, Ukraine, 65044. E-mail: 10466364@stud.op.edu.ua; ph.: +38 067 862 7033

**Яворський Олександр Володимирович**, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: 10466364@stud.op.edu.ua; тел.: +38 067 862 7033

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1101-1085>



**Gennady Io. Galanter**, Master's student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko ave., Odesa, 65044, Ukraine, 65044. E-mail: gengalanter@stud.op.edu.ua, ph.: +38 048 705 8374

**Галантер Геннадій Йосипович**, магістрант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: gengalanter@stud.op.edu.ua; тел.: +38 048 705 8374

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-3004-8000>

## Управління тепловим навантаженням котла при спалюванні твердих побутових відходів

Т. Д. Марколенко, Д. Г. Проданов, Я. І. Беглов  
Національний університет «Одеська політехніка»

**Анотація.** У статті розглянуто питання управління тепловим навантаженням котла при спалюванні твердих побутових відходів (ТПВ). Визначено основні технологічні особливості процесу, включаючи необхідність підтримки високих температур для мінімізації шкідливих викидів та запобігання шлакуванню. Описано автоматизовану систему керування установкою, що включає регулятори потужності, температури киплячого шару, економічності процесу та рівня викидів шкідливих речовин. Проведено імітаційне моделювання, яке підтвердило ефективність запропонованої системи керування, зокрема її здатність компенсувати зміни складу паливної суміші та забезпечувати стабільну роботу установки.

**Ключові слова:** тверді побутові відходи, киплячий шар, автоматизована система керування, теплове навантаження, моделювання.

### Вступ

Енерготехнологічні установки, основним паливом яких є тверді побутові відходи, є найдоступнішим і економічно доцільним поновлюваним джерелом енергії. Нині тільки в Європі за рахунок термічної утилізації відходів виробляється понад 28 млрд. кВт·год електроенергії і приблизно 70 млрд. кВт·год теплової енергії [1, 2]. При цьому слід зазначити, що крім енергозабезпечення шляхом термічної переробки відходів вирішується важлива соціальна проблема – очищення великих міст від ТПВ.

Основним способом термічної переробки ТПВ на сьогодні є їх пряме спалювання. Специфіка котельних установок, що спалюють тверді побутові відходи, порівняно з традиційними котлами, зумовлена необхідністю спалювати їх з великими надлишками повітря ( $\alpha \sim 1,8$ ) через широкий діапазон зміни теплоти згоряння та елементного складу компонентів ТПВ; обов'язковим витриманням газоподібних продуктів згоряння за температури понад 850 °C протягом 2 с і більше для деструкції органічних забруднювачів, насамперед полі хлоровані дибензодіоксини і фурані; обмеженням температури димових газів на вході до конвективних поверхонь (не більш як 750 °C) за умовами мінімізації шлакування цих поверхонь; підтримкою оптимальної для роботи системи

газоочищення температури димових газів на виході з котла (зазвичай 180...200 °C); застосуванням багатоступеневої системи газоочищення [3].

Для термічного знешкодження відходів широкого поширення набули печі з псевдозрідженим (киплячим) шаром [4]. У печах з киплячим шаром продукт переходить у завислий стан у камері згоряння потоком повітря, що проходить через шар сипкого (порошкоподібного або подрібненого) матеріалу, не переміщаючись у напрямку цього потоку. Швидкість газового потоку має бути достатньою для того, щоб частинки перебували в підвішеному стані і вихровому турбулентному русі, що нагадує потік киплячої рідини. У нагрітому киплячому шарі відбувається інтенсивний теплообмін між частинками і газом. Теплопередача в киплячому шарі в 4 рази вища, ніж у нерухомому.

Під час спалювання відходів у вихровому киплячому шарі особлива увага приділяється недопущенню таких порушень технологічного процесу:

- у розподілі або витраті первинного (охолоджувального) повітря;
- у роботі контуру зовнішньої циркуляції матеріалу шару;
- пов'язані з відхиленням температури шару за встановлені межі;
- викликані потраплянням і накопиченням великих матеріалів, насамперед металевих фрагментів, у шарі.

© Марколенко Т. Д., Проданов Д. Г.,  
Беглов Я. І., 2025

Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Ці відхилення технологічних режимів можуть викликати шлакування киплячого шару, що призводить до тривалого зупинення всієї енерготехнологічної установки.

Велика увага приділяється визначенню допустимих температур у зоні киплячого шару. Відомо, що за температури понад 700 °С існує велика ймовірність шлакування шару та інтенсивного утворення нашарувань на стінах топки. Спалювання відходів за температури нижче ніж 550 °С відбувається з неповним згорянням окремих компонентів ТПВ, що зрештою спричиняє завал поду топки непрогорілими відходами.

Для регулювання цієї температури застосовують різні способи: шляхом спалювання додаткового палива в пальниках, розміщених у зоні киплячого шару, що призначені для розпалювання, завдяки упорскуванню води, зміною витрати та перерозподілом повітря, що подається під решітку, та інші.

Проблеми оптимального спалювання органічних сполук завжди приділялася велика увага. Система контролю горіння є однією з основних систем управління піччю або котлом. За час експлуатації котельного обладнання розроблено велику кількість схем керування різними видами палива (твердим, рідким і газоподібним), які вже стали стандартними. Однак при розробці обладнання та САК до нього передбачається, що в процесі експлуатації склад палива буде змінюватися в невеликому, заздалегідь заданому діапазоні.

З проведеного огляду джерел інформації можна зробити наступні висновки:

- спалення твердих побутових відходів у сміття-спалювальних установках практикується доволі активно та достатньо довго;
- одним з способів спалення є використання топок киплячого шару;
- керування котлами, які спалюють сміття, виконується за традиційними схемами керування яка використовується для спалення твердого палива (вугілля);
- коливання складу паливної суміші, які викликають зміну теплотворної здатності та кількості повітря, що подається на спалювання, не компенсуються. Процес проводиться з великим надлишком повітря для запобігання утворенню шкідливих викидів;
- існують системи керування які здатні компенсувати коливання складу паливної суміші, але вони використовуються при спаленні газоподібних сумішей.

## 1. Постановка задачі керування навантаженням паро генеруючого устаткування

Об'єктом керування є установка спалення твердих побутових відходів (ТПВ) з метою отримання теплової енергії у вигляді перегрітої пари або гарячої води.

Технологічний процес полягає у наступному. Подрібнені ТПВ (паливна суміш) подається в топку. У топці розташований киплячий шар, який складається з паливної суміші, інерту (піску, вапняку, тощо). Завдяки робочій температурі шару паливна суміш осушується, підігрівається та спалюється. Також у топці розташовані радіаційні поверхні нагріву, які сприймають випромінювання від матеріалів, що спалюється. Після топки встановлений циклон, що уловлює та повертає назад частинки шару. Через подову частину топки відводиться частина шихти, яка або видаляється на золівдвал, або направляється у винесений теплообмінник. В ньому шихта охолоджується до необхідної температури і знов подається до топки. Для зв'язування сполук сірки (оксидів та діоксидів) та хлору (зазвичай випарів соляної кислоти) у топку додаються вапно та сода. Для створення киплячого шару у нижню частину топки, під розподільчу решітку, підводиться повітря. Це повітря називається первинним. Частина повітря підводиться над шаром і служить для повного окиснення горючих сполук паливної суміші. Це повітря називається вторинним.

Особливістю роботи сміттеспалювальних установок є різко змінний склад побутових відходів, що подаються на переробку. Також особливою відмінністю спалювання сміття є ризик утворення шкідливих сполук, таких як діоксиди сірки, оксиди азоту, сполуки хлору, діоксини і фурані. Для запобігання утворення таких сполук дуже важливо підтримувати температуру киплячого шару.

Для підвищення точності підтримання технологічних параметрів пропонується доповнити штатні системи регулювання пристроєм визначення бруто-формули паливної суміші.

Таким чином метою роботи є розробка та дослідження системи автоматизованого керування тепловою потужністю сміттеспалювальної установки з компенсацією збурень навантаження та зміни складу палива шляхом визначення складу паливної суміші методом визначення її бруто-формули для забезпечення необхідних параметрів технологічного процесу.

## 2. Імітаційна модель САК тепловою потужністю сміттєспалювальної установки

Імітаційна модель складається з чотирьох ділянок:

- моделі топки низько температурного киплячого шару «Low Temp Fluorized Bed»;
- моделі теплообмінних поверхонь «heat transfer surface model»;
- моделі теплообміннику для охолодження шихти «Inert Cooler»;
- моделі зв'язування сполук сірки «sulphur absorption model».

Кожна з моделей була отримана у результаті попередніх досліджень [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Таким чином в об'єкті регульованими параметрами є:

- навантаження (вимірюваним параметром може бути тиск пари після котла);
- температура киплячого шару;
- концентрація діоксиду сірки в димових газах;
- економічність процесу спалення (вимірюваним параметром є склад димових).

Керуючими впливами є:

- витрата паливної суміші (ТПВ);
- витрата води на охолодження шихти;
- витрата вапняку;
- витрата вторинного повітря.

Зовнішніми збуреннями на об'єкт є:

- задане навантаження (потужність)

установки;

- склад паливної суміші (ТПВ).

Схему імітаційної моделі АСК установки для спалення ТПВ показано на рисунку 1.

На рисунку застосовано такі позначення:

*Boiler* – об'єкт керування;

*Power Contr* – регулятор потужності установки;

*Air Contr* – регулятор економічності (витрати повітря);

*Fl Bed Temp Contr* – регулятор температури киплячого шару;

*Lime Flow Contr* – регулятор витрати вапна;

*Waste Composition Disturb* – пристрій моделювання складу паливної суміші;

*Load, Flows, Bed Temp, Sulfur* – блоки виведення графіків (Score);

*Setpoint* – блок сигналу завдання потужності.

Пропонована система керування має наступні особливості.

Для компенсації впливу складу паливної суміші (ТПВ) використаний засіб визначення бруто формули палива [10]. Визначення бруто формули паливної суміші дає можливість з випередженням визначити теплотворну здатність палива та визначити теоретичну кількість повітря, яке йде на спалення. Ця інформація подається на регулятор навантаження та регулятор економічності, відповідно.

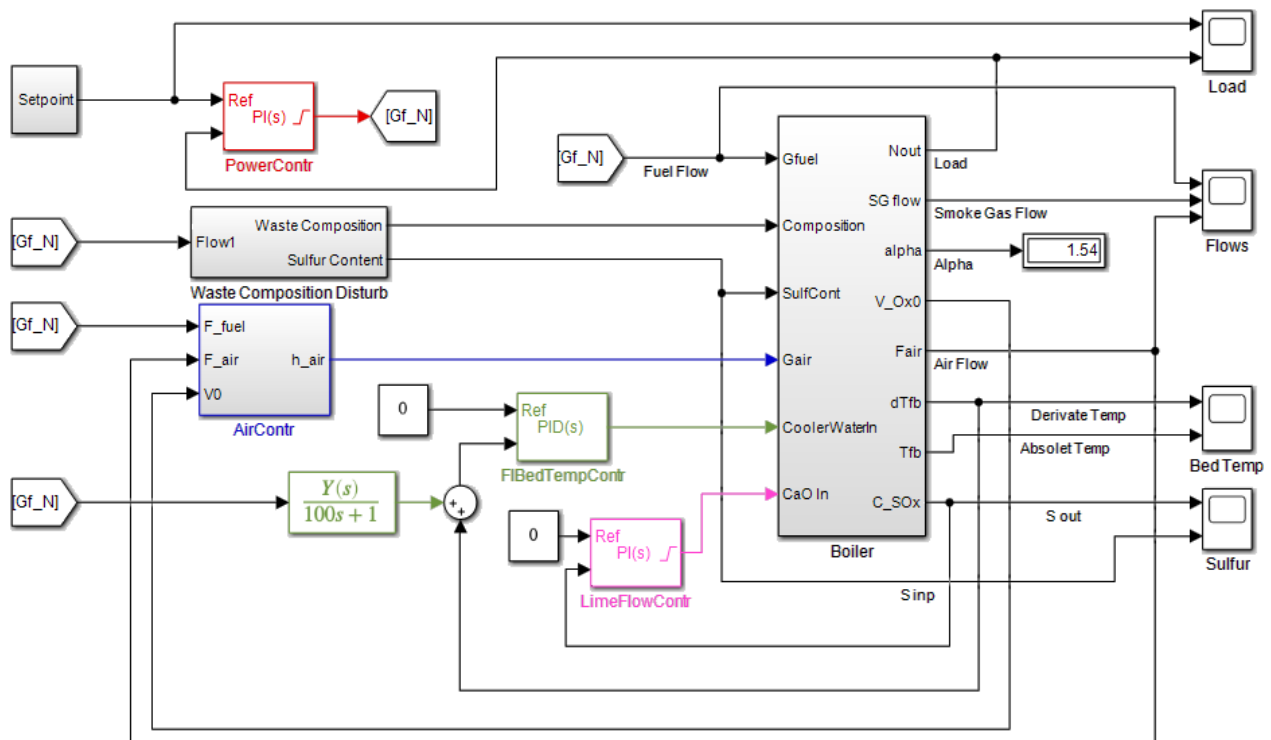


Рис.1. Схема імітаційної моделі САК установки спалювання ТПВ

Однак дослідження показали, що топка з ЦКШ має доволі велику інерційність, як за витратою палива так й витратою повітря, тому різка зміна витрати паливної суміші може призвести до «завалу» топки і виникнення аварійного стану. Тому було прийняте рішення відмовитись від введення в регулятор потужності сигналу про теплотворну здатність палива, залишивши цей сигнал тільки для контролю. Таким чином при спаленні ТПВ динамічні характеристики котла визначаються характеристиками топки.

І навпаки, введення сигналу про теоретичну кількість повітря дозволило збільшити точність підтримання такого складу димових газів, який відповідає мінімальним втратам теплоти від хімічного недопалу та з газами, що відходять. А також за рахунок збільшеної кількості повітря дозволяє зменшити температуру горіння палива в киплячому шарі. Це можна вважати первинним регулюванням температури киплячого шару.

Вторинне регулювання температури шару відбувається за рахунок винесеного трубчастого теплообмінного апарату. Теплообмінні труби занурені у циркулюючу шихту. За рахунок зміни витрати води скрізь цей теплообмінник регулюється температура шихти, що повертається у топку. Така схема регулювання дозволяє підтримувати температуру шихти з більшою точністю у перехідних режимах роботи установки.

Процеси регулювання при нанесенні збурень значенням необхідної потужності та складом паливної суміші, показані на рисунках 2 – 5.

На рисунку 2 наведено змінення завдання по навантаженню та відповідне змінення значення навантаження установки. Крім того на графіку навантаження у моменти часу 5000 с та 7000 с можна побачити невеликі відхилення, які відповідають нанесенню збурень складом паливної суміші.

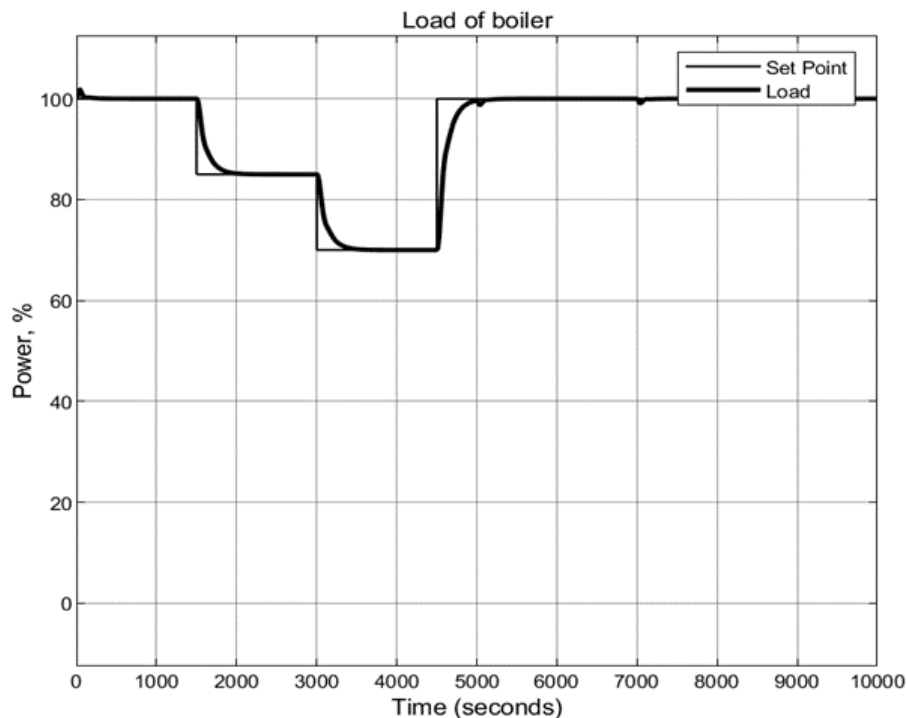


Рис. 2. Графік навантаження установки спалення ТПВ

Виходячи з графіку, можна зробити висновок, що система керування задовольняє вимогам, щодо підтримання заданого теплового навантаження. Збурення складом паливної суміші компенсуються повністю. Спостерігаються незначні, менш 1 %, відхилення потужності, які повністю компенсуються протягом 2-3 хвилин.

На рисунку 3 наведено перехідний процес регулювання температури киплячого шару. Наведено як відхилення від номінального

значення 800 °С. Моменти відхилення температури від номінального значення відповідають моментам змінення потужності (1500 с, 3000 с та 4500 с) та моментам змінення складу паливної суміші (5000 с та 7000 с).

Виходячи з графіку, можна зробити висновок, що система керування задовольняє вимогам щодо підтримання температури киплячого шару. При аналізі графіку перехідного процесу варто відмітити, що при однаковому збуренні потужністю у 15 %, але при різних

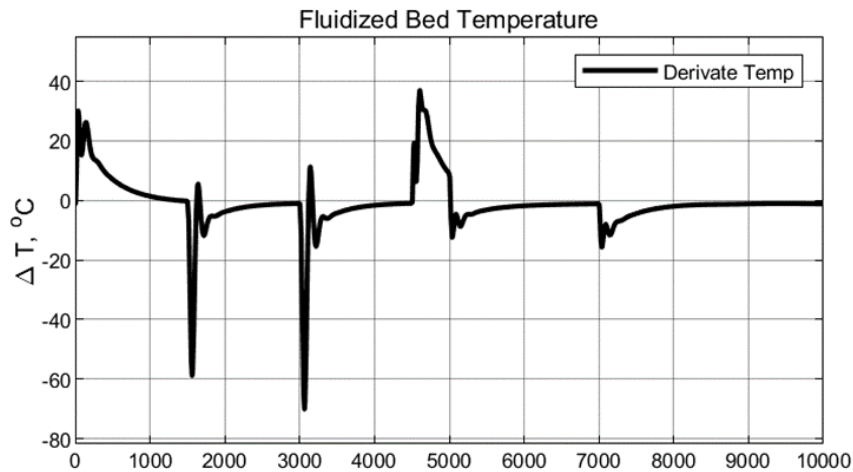


Рис. 3. Перехідний процес регулювання температури киплячого шару

значеннях потужності (див. рис. 2), величина відхилення температури різна. Це пояснюється нелінійними характеристиками об'єкта керування. Також відрізняється як величина так і форма перехідного процесу при збільшенні потужності.

Таким чином якість керування температурою киплячого шару накладає

обмеження на величину збурення, яку може компенсувати система керування. Виходячи з результатів імітаційного моделювання рекомендовано не перевищувати величину збурення у 15 % потужності.

На рисунку 4 наведені значення витрат паливної суміші, повітря та димових газів.

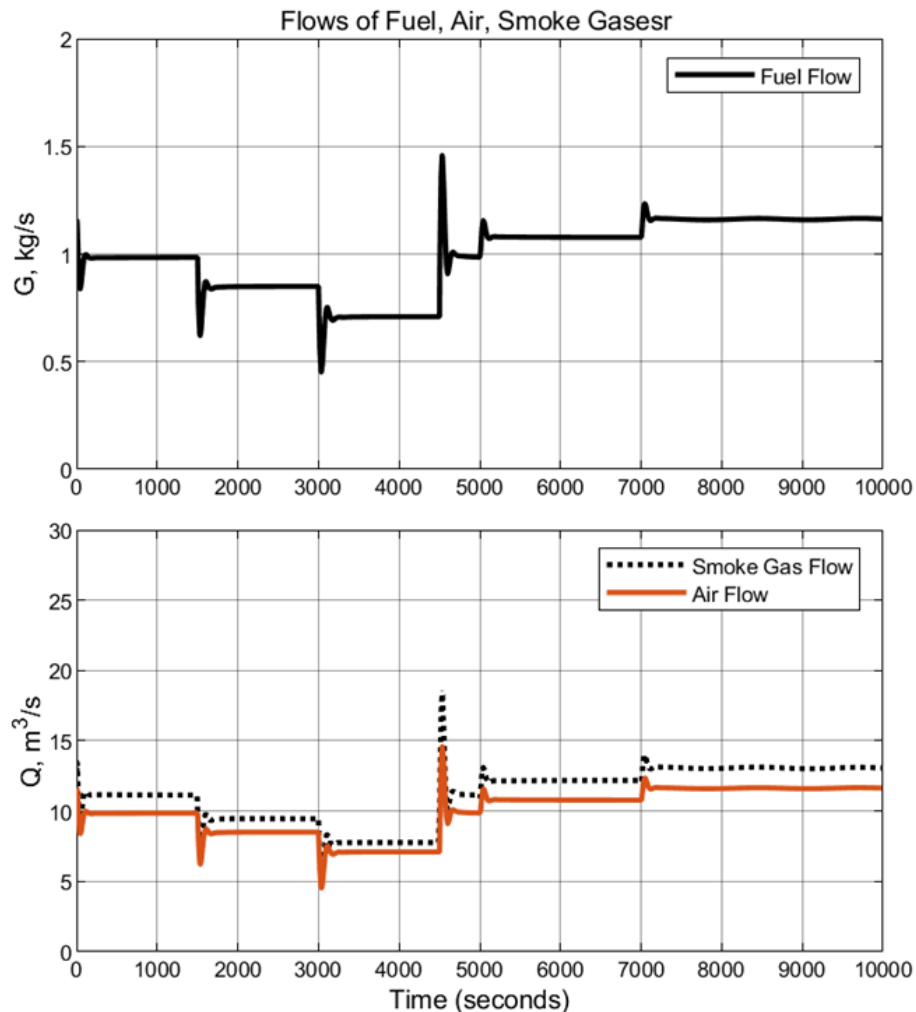


Рис. 4. Графік значень витрат паливної суміші, повітря та димових газів

Аналіз графіків показує що відхилення технологічних параметрів знаходяться у розрахункових межах. Регулюючі органи переміщуються у робочих діапазонах, без виходу на обмеження.

На рисунку 5 наведено графіки перехідного процесу регулювання оксидів сірки. На верхньому графіку наведено відхилення концентрації SO<sub>x</sub> у димових газах. На нижньому графіку – концентрація сірки у початковій сировині, яка подається на спалювання.

До моменту часу 7000 с моделювалось типове значення концентрації сірки у ТПВ, на рівні 0,5 – 0,8 % до 5000 с та 1 – 1,5 % від 5000 с до 7000 с. Починаючи з 7000 с було змодельоване вміст сірки у складі ТПВ до 10 %. Для типового вмісту сірки концентрація оксиду сірки SO<sub>x</sub> у димових газах знаходиться у межах допустимих середньодобових значень 0,05 мг/м<sup>3</sup>, для значно збільшеного значення – у межах допустимого разового викиду у 0,5 мг/м<sup>3</sup> [3].

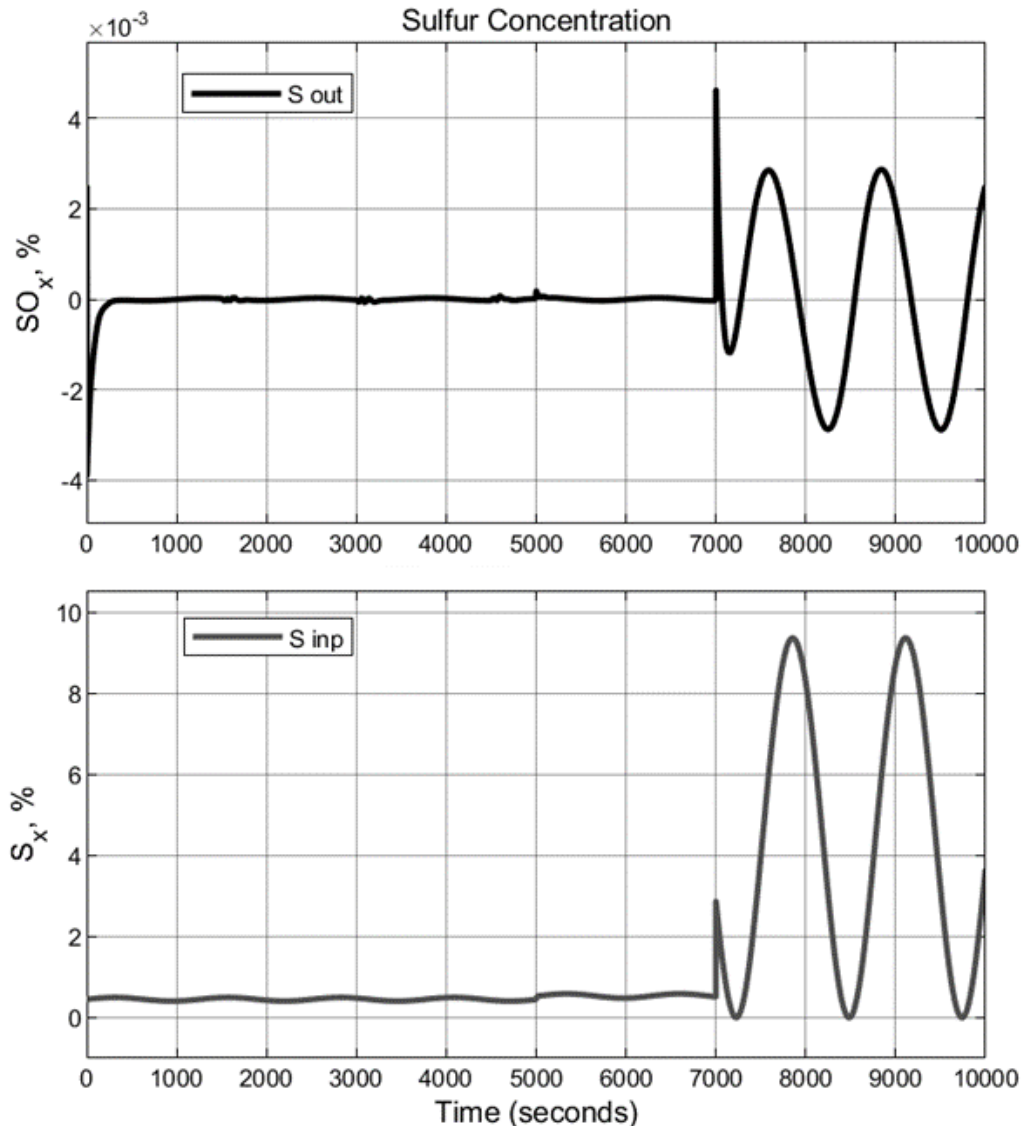


Рис. 5. Графіки перехідного процесу регулювання оксидів сірки

### Висновки

У роботі розглянуто проблему керування тепловим навантаженням котла при спалюванні твердих побутових відходів у киплячому шарі. Синтезовано автоматизовану систему керування установкою. При цьому означені регульовані технологічні змінні, керуючі впливи. Виділено чотири основних регулятора, а саме потужності,

температури шару, економічності, та викидів шкідливих речовин. Проведено імітаційне моделювання системи.

Розроблена автоматизована система керування дозволяє стабілізувати процес горіння, мінімізувати викиди шкідливих речовин та підвищити ефективність використання енергії.

Проведене моделювання показало, що запропонована система:

– Забезпечує підтримку стабільної температури киплячого шару, що критично важливо для ефективного спалювання ТПВ та запобігання утворенню шлаку.

– Автоматично адаптується до змінного складу палива, коригуючи подачу повітря та пального з урахуванням динаміки процесу горіння.

– Дозволяє зменшити рівень викидів оксидів сірки та інших шкідливих речовин за рахунок оптимізації режимів горіння.

– Покращує економічні показники установки шляхом зменшення надлишкової витрати палива та підвищення ККД процесу.

Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації промислових установок спалювання ТПВ, зокрема в частині розробки інтелектуальних систем керування з використанням машинного навчання та прогнозування параметрів процесу в реальному часі.

### Список використаної літератури

1. Yrjö Majanne, Timo Yli-Fossi, Timo Korpela, Maria Nurmoranta, Jukka Kortela, Utilization of Drum Boilers' Storage Capacity for Flexible Operation, IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, 2017, Pages 2005-2010, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.186>.

2. Joris Koornneef, Martin Junginger, André Faaij, Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 33, Issue 1, 2007, Pages 19-55, ISSN 0360-1285, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128506000335>)

3. ЕМЕП/ЕЕА air pollutant emission inventory guidebook 2023: Technical guidance to prepare national emission inventories (ЕМЕП/ЕЕА Guidebook). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. ISBN 978-92-9480-598-0 ISSN 1977-8449. doi: 10.2800/795737

4. Alfe, M. et al. (2010) The effect of temperature on soot properties in premixed methane flames. Combustion and Flame, Vol. 157, pp. 1959-1965. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.007>

5. Dobrovolskaya, T.S., Maksimov, M.V., Lozhechnikov, V.F., Bondarenko, A.V. The mathematical model of non-certified fuel combustion. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 2, No. 8(68), 2014, 44-51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22420>

6. Ткаченко, А.Е. Синтез динамической модели котельного агрегата низкотемпературного кипящего слоя / А.Е. Ткаченко, Б.В. Гавриленко // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XV научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке, 20-22 мая 2015. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 195-198.

7. Гавриленко, Б.В. Синтез математической модели топки кипящего слоя шахтного воздухоподогревателя при нестационарных условиях для задач автоматического управления / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Моделирование та інформаційні технології: Зб. наук. пр. – К.: ПІМЕ ім. Г.С.Пухова НАН України, 2010. – Вип. 57. – С. 164-173.

8. Беглов, К. В., Козлов, О. В., Кондратенко, Ю. П., Марколенко, Т. Д. і Кривда, В. І. (2023) «Автоматичне керування тепловою потужністю котла на основі зміни теплоти згоряння вуглеводневого палива», International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics", 68(2), с. 75–92. doi: 10.34229/1028-0979-2023-2-6. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «А»)

9. Вовк І.В., Беглов К.В. Моделирование водогрейных котлов при глубоких збуреннях за змістом палива. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки». 2018. Вип. 29 (68). № 6 (1). С 116–121. Доступно за адресою:

[http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6\\_2018/part\\_1/22.pdf](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_1/22.pdf) (Дата звернення: [3 лютого 2025])

10. Патент України на винахід № 120216. Установка для визначення складу горючого газу при його спалюванні / Максимов М.В., Брунеткін О.І., Лисюк О.В., Тарахтій О.С. № а201712785; заявл. 22.12.2017; опубл. 25.10.2019, Бюл. N 20.

### References

1. Yrjö Majanne, Timo Yli-Fossi, Timo Korpela, Maria Nurmoranta, Jukka Kortela. (2017). Utilization of Drum Boilers' Storage Capacity for Flexible Operation, IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, 2017, Pages 2005-2010, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.186>.

2. J. Koornneef, M. Junginger, A. Faaij (2007). Development of fluidized bed combustion – An overview of trends, performance and cost, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 33, Issue 1, 2007, Pages 19-55, ISSN 0360-1285,

<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.001>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128506000335>)

3. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: Technical guidance to prepare national emission inventories (EMEP/EEA Guidebook). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. ISBN 978-92-9480-598-0 ISSN 1977-8449. doi: 10.2800/795737

4. Alfe, M. et al. (2010). The effect of temperature on soot properties in premixed methane flames. *Combustion and Flame*, Vol. 157, 2010, pp. 1959-1965.

<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.007>

5. Dobrovolskaya, T.S., Maksimov, M.V., Lozhechnikov, V.F., Bondarenko, A.V. (2014). The mathematical model of non-certified fuel combustion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 8(68), 2014, p. 44-51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22420>

6. Tkachenko, A.Ye. and Havrylenko, B.V. (2015) 'Synthesis of a dynamic model of a boiler unit with a low-temperature fluidized bed', *Automation of technological objects and processes. Search for the young: Collection of scientific papers of the XV scientific and technical conference of graduate students and students in Donetsk*, May 20–22, 2015, Donetsk: DonNTU, pp. 195–198.

7. Havrylenko, B.V. and Neezhmakov, S.V. (2010) 'Synthesis of a mathematical model of a fluidized bed furnace of a mine air heater under non-

stationary conditions for automatic control tasks', *Modeling and Information Technologies: Collection of Scientific Papers*, Kyiv: H.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the NAS of Ukraine, Issue 57, pp. 164–173.

8. Beglov, K., Kozlov, O., Kondratenko, Yu., Markolenko, T. and Krivda, V. (2023) 'Automatic control of the boiler heat power based on changing hydrocarbon fuel's calorific value', *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 68(2), pp. 75–92. doi: 10.34229/1028-0979-2023-2-6. (Register of Scientific Professional Publications of Ukraine, Category "A").

9. Vovk, I.V. and Beglov, K.V. (2018) 'Modeling of water heating boilers with deep disturbances in fuel content', *Scientific Notes of the Tavriya National University Named After V.I. Vernadsky. Series "Technical Sciences"*, 29(68), 6(1), pp. 116–121. Available at: [http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6\\_2018/part\\_1/22.pdf](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_1/22.pdf) (Accessed: [3 February 2025]).

10. Maksimov, M.V., Brunetkin, O.I., Lysyuk, O.V. and Tarakhtiy, O.S. (2019) Patent of Ukraine for the invention No. 120216. Installation for determining the composition of combustible gas during its combustion. Application No. a201712785, filed 22 December 2017, published 25 October 2019, Bulletin No. 20.

## Boiler thermal load control during the combustion of solid household waste

T. Markolenko, D. Prodanov, Y. Beglov

<sup>1</sup>Odessa National Polytechnic University

**Abstract.** *In modern conditions of increasing volumes of solid household waste (SHW) and the need for its environmentally safe disposal, particular attention is paid to fluidized bed combustion technologies. This approach significantly reduces waste volume, generates additional thermal energy, and minimizes the negative impact on the environment. However, effective SHW combustion in a fluidized bed requires precise control of combustion parameters, as fuel composition variations and temperature fluctuations can lead to decreased process efficiency, the formation of harmful emissions, and emergency situations.*

*This study addresses the issue of automated control of the SHW combustion process in a fluidized bed, aimed at ensuring the stability of the temperature regime and the optimal air-to-fuel ratio. A control system using adaptive regulation algorithms has been proposed and developed to maintain the required process parameters. The primary focus is on developing a mathematical combustion model in a fluidized bed that accounts for dynamic changes in fuel composition, bed temperature, and air supply rate.*

*The simulation results showed that the proposed control system significantly improves SHW combustion efficiency, reduces SO<sub>x</sub> emissions, and minimizes the formation of residual combustion products. The proposed control strategy can be implemented in industrial facilities to enhance the environmental safety and energy efficiency of waste disposal processes.*

**Keywords:** *solid household waste, fluidized bed, automated control system, thermal load, modeling.*

Отримано 18.02.2025

### Про авторів



**Марколенко Тетяна Дмитрівна**, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: tanyadmb@ukr.net; тел.: +38 067 581 3727

**Tetiana D. Markolenko**, postgraduate student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: tanyadmb@ukr.net; ph.: +38 067 581 3727.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3639-2232>



**Проданов Дмитро Геннадійович**, магістрант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: tkalenkodanilo@stud.op.edu.ua; тел. +38 099 791 8184

**Dmitro G. Prodanov**, Master's student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: tkalenkodanilo@stud.op.edu.ua; ph.: +38 099 791 8184.

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-4144-5763>



**Беглов Ярослав Ігорович**, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: yarikb2394@stud.op.edu.ua; тел. +38 097 426 8651

**Yaroslav I. Beglov**, postgraduate student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: yarikb2394@stud.op.edu.ua; ph.: +38 097 426 8651

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-9864-2711>

# Improvement of automation in managing thermal destruction of municipal solid waste through software recovery from failures

K. Kirkopulo<sup>1</sup>, V. Tonkonogyi<sup>1</sup>, M. Maksymov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Odesa Polytechnic National University

<sup>2</sup>National University «Odesa Maritime Academy Institute of the Naval Forces»

**Abstract.** The article presents the results of improving automation in managing the thermal destruction of municipal solid waste (MSW) through software recovery after failures. A functional structure and selected technological parameters (as controlled coordinates) for a hierarchical automatic control system (ACS) for MSW thermal destruction were proposed. A homogeneous Markov chain was used to model the failure and fault parameters of cyclic software operation. The application of the ACS with the proposed recovery structure ensures software reliability by adjusting the threshold number of failures. This recovery implementation reduces environmental pollution in stationary modes with known raw material composition, in dynamic modes with material composition changes, and during pyrolysis plant start-up. The proposed approach enhances the accuracy of controlling key technological parameters, operational reliability, and economic performance.

**Keywords:** automation, automatic control system, thermal destruction, municipal solid waste, recovery, software, failure, Markov chain, environment.

## Introduction

Environmental pollution is one of the most pressing modern issues, caused by rapid industrial development and urbanization in many countries. Among the most effective solutions is a fundamentally new technology for municipal solid waste MSW utilization that produces alternative fuel, generally known as thermal destruction. This utilization technology combines circulation pyrolysis and thermally stable gasification into a single process, allowing complete MSW utilization in environmentally safe and energy-efficient modes. This technology also produces gaseous fractions of alternative fuel, which are suitable for use in energy facilities without additional purification [1].

To implement such technology, specialized technological complexes are used, which are complex multicomponent technical objects requiring a specialized hierarchical computerized automatic control system (ACS) [2]. Comprehensive automation of technological complexes for MSW utilization is impossible without highly reliable software, which significantly improves operational efficiency and economic performance.

Addressing the task of improving automation for managing the thermal destruction of MSW should be based on analyzing the main properties

and technical characteristics of the technological process with the selection of technological measurement parameters for control adjustments. On the other hand, the complex formalization of chemical-technological process control tasks necessitates increased reliability of ACS software. Despite significant efforts to improve software reliability, such as automated software design systems, libraries of standard procedures, and improved diagnostic tools, errors in software persist. It is believed that completely eliminating software errors is impossible due to the inherent complexity of software systems. The main groups and sources of errors are analyzed in [5], while the consequences of errors are described in [5,6].

An alternative approach to increasing software reliability involves recovering software after failures by utilizing reserves in processing time and computational resources [6].

**The goal of this article** is to enhance the reliability of ACS software for managing MSW thermal destruction using recovery during the processing of selective measured parameters when adjusting control actions for the input material composition and evaluating the impact of recovery on process efficiency.

## 1. Fundamental Diagram of a Thermal Destruction Plant for MSW [7].

A typical plant (Figure 1) allows:

In stationary operational modes, where the

composition of the processed raw material is known, to completely gasify its organic components by calculating the minimum required amount of air and adjusting its supply;

- During operation, to monitor the composition of the input material and adapt to changes in control actions by switching to a mode of identifying the composition for restoring management stability;

- In dynamic modes, when the composition of the input material changes, and during the plant's startup, to determine the current composition and enthalpy of the input material.

The schematic of the plant's main part – the Reactor III – is shown in Figure 1. Its operation principles and the values of certain parameters for stationary operation modes correspond to the descriptions provided above. Through Collector I, the input material is supplied to the reactor at a flow rate of  $G_1$ .

Through Collector II, the hot product gas exits the reactor at a flow rate of  $Q_2$ , entering the main system and splitting into two streams:  $Q_4$  – to the consumer;  $Q_3$  – via the recirculation line back into the reactor at point V for drying and heating the input material.

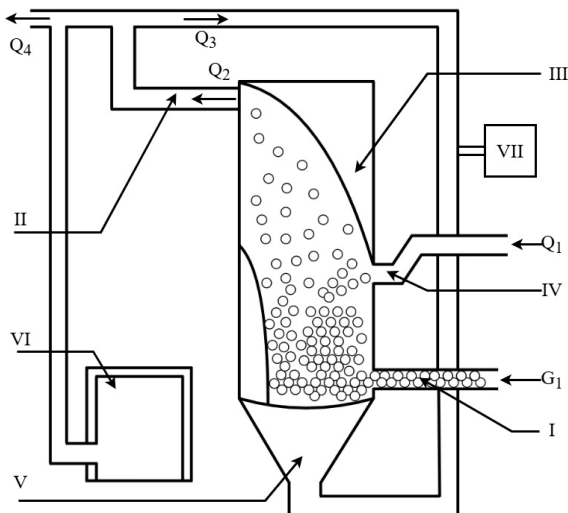


Fig. 1. Schematic diagram of a pyrolysis plant

Through Collector IV, the necessary amount of air is supplied at a flow rate of  $Q_1$ .

In stationary operational mode and complete gasification of the organic component of the input material, the gross formula of the gas matches that of the input material. The gas composition and its stability are controlled using Device VII, based on the method [8] of determining the gross formula of combustible gas mixtures during their combustion in a specialized device [9]. This process involves measuring the flow rates of the gas mixture, air, and exhaust gases under varying flow rates of the mixture. The gas mixture may include non-combustible gases as well.

If a change in the product gas composition is detected, the plant shifts from the gasification mode to combustion mode. This is achieved by increasing air supply through Collector IV to ensure the input material with an unknown altered composition is completely converted into gaseous products. Subsequently, Device VII determines their gross formula and the new composition of the input material. Based on this data, the plant transitions back to pyrolysis (gasification) mode by adjusting air supply to match the new batch composition.

For the technological implementation of this process, the plant is equipped with approximately 1500 information-measurement channels transmitting no fewer than 20000 individual signals, each carrying parameter values.

## 2. Development of data collection algorithm

The hardware implementation of the control system for the thermal destruction chemical-technological complex of MSW includes data collection modules and data output interfaces, as well as programmable logic controllers for control. The data collection modules receive analog signals from various sensors and convert them to digital data, which is transmitted to the ACS via RS485 network using the DCON protocol at 115200 baud. Programmable logic controllers perform the functions of automatic regulation of specified values of controlled variables in the chemical-technological process of MSW thermal destruction, as well as transmission to the operator interface implemented on a personal computer.

The output modules, in turn, implement the conversion of digital control signals from programmable logic controllers into analog signals, which directly go to the control elements of the installation's technological parameters.

To receive signals from different types of sensors in this control and monitoring system, the following types of data collection modules are used: thermocouple data collection modules, current output sensor data collection modules (4...20 mA), and discrete input modules. To implement the conversion of digital control signals from PLC to analog signals that directly go to the control elements of the installation's technological parameters, analog output modules are used.

For example, ICP DAS data collection modules have the following operating algorithm (Fig. 2) [10].

The system operation begins with a configuration check procedure, which determines the composition of modules and their addresses. Based on the verification results, appropriate changes can be made. According to the specifics of the tasks being solved, the configuration of each module is deter-

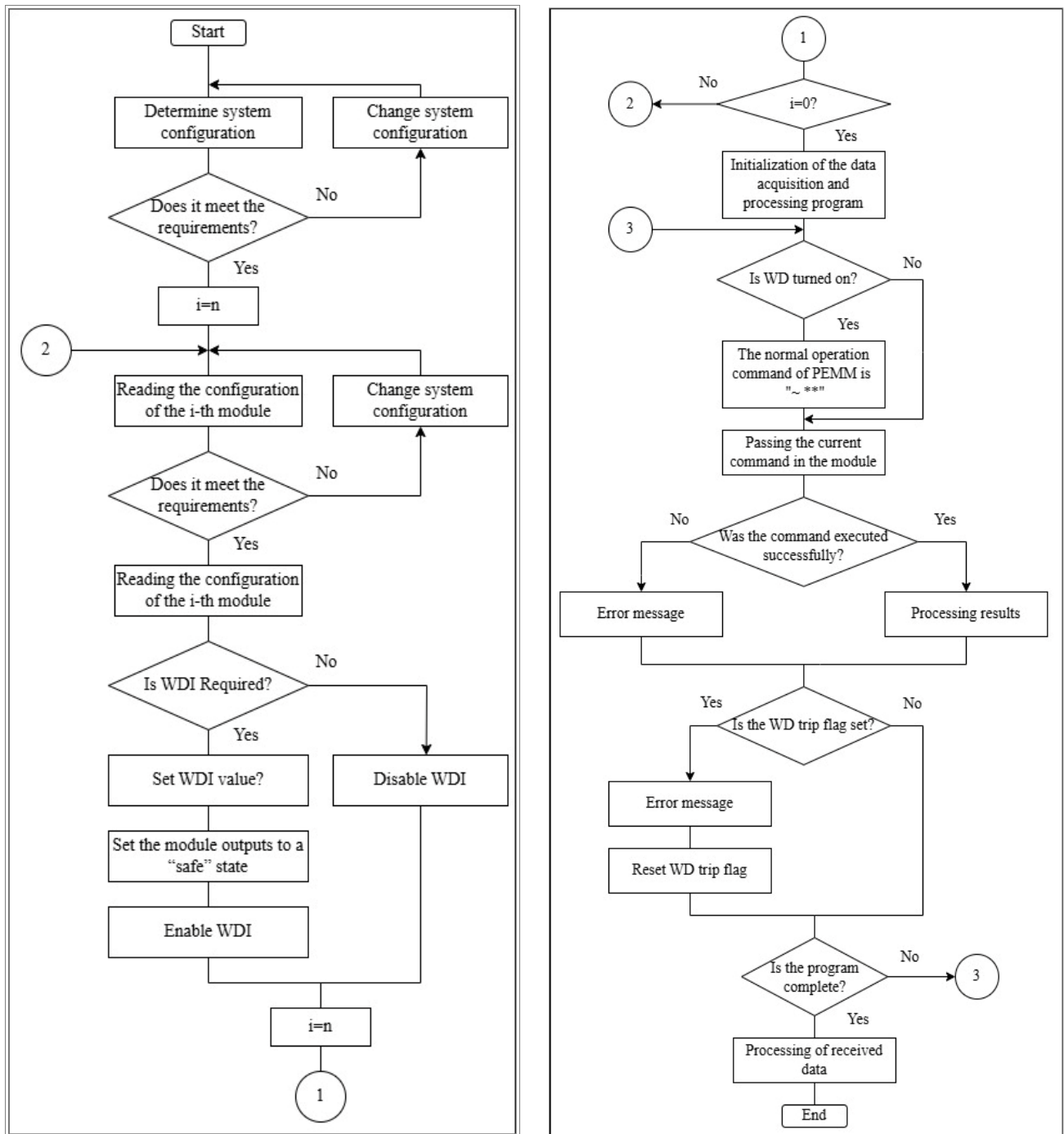


Fig. 2. Block diagram of ICP DAS data acquisition modules

mined, which is controlled through the user interface.

Depending on the system operating conditions, a decision is made about using the watchdog timer (WD) and setting its parameters. After configuring the modules, a data collection and processing program is developed. When using WD, the watchdog timer is reset in each cycle of current command execution.

Command processing by the module includes sequential verification of the following parameters: RS-485 interface exchange rate; operation code; module address; checksum analysis, if provided;

operation execution correctness; frame completion correctness.

To increase information reliability, «Set Value» and «Check Value» commands are used. However, with increased speed requirements, such checks can be minimized.

Monitoring the WD trigger flag helps prevent system «hanging». Depending on the algorithm's specifics, data processing can be performed after executing each command and/or at the end of the information collection procedure (for example, when building graphs).

Input information reading from modules can be performed in asynchronous or synchronous modes. Synchronous mode is used when it is necessary to temporarily fix input parameter values in several modules.

To implement synchronous mode, a synchronized sampling command should be used, by which modules supporting this mode store input information in internal registers. Then, information from these registers is read asynchronously.

The hardware for measuring basic technical parameters of the ash utilization technological complex includes various sensors of the complex's operating parameters, including: temperature sensors - thermocouples of two types: TXK - for measuring temperatures in the range of  $-40...600^{\circ}\text{C}$ , and TXA - for measuring temperatures in the range of  $-40...1050^{\circ}\text{C}$ ; level sensors - float type - for level measurements, and radar type - for measuring raw material level in the pyrolysis reactor; pressure sensors; gas and liquid flow sensors and others. Analysis of the implemented software architecture (TRACE MODE 6) showed satisfactory values of 3 to 5 failures per eight-hour operator shift. Subsequently, the task arises to develop a methodology for calculating such a value.

### 3. Method for Improving the Reliability of ACS Software for the Thermal Destruction of Solid Waste

A failure is understood as a disruption in the functionality of the software for a duration shorter than a threshold value. Conversely, a fault refers to a disruption in software functionality that exceeds this threshold. If no recovery actions are taken, all failures effectively become faults. The threshold recovery time is determined by the nature of the Automatic Control System (ACS).

Let us consider the organization of the software structure of the ACS for the thermal destruction of solid waste. This software operates in a cyclic mode, meaning that the following sequence of actions is repeatedly executed (see Figure 2): polling sensors and receiving commands from the operator or other systems; analyzing and processing sensor readings and generating control actions; and finally, executing the control actions.

Sensor readings and operator commands serve as input data. Operator commands and signals from other systems are usually strictly formalized and undergo verification before execution, allowing invalid commands that could disrupt the software's functionality to be discarded. However, sensor readings are subject to inaccuracies from the sensors themselves and their converters, as well as random

noise in communication channels, which can lead to significant distortion of readings.

During the development of ACS software, debugging and testing are performed. The most critical software functions undergo a verification procedure that defines the process for conducting checks and documenting identified deviations. However, verification is carried out on a limited set of initial data selected during software design and cannot guarantee absolute fault-free operation. Therefore, debugging and testing are conducted on a finite set of initial data—control examples. Based on the results of debugging and testing, one can confidently assert the software's fault-free operation for these control examples, but its reliability for other initial data remains uncertain.

Meanwhile, during software operation, input data combinations that were not included in the control examples may occur, leading to failures. In most cases, software functionality can be restored by simply skipping the cycle in which the failure occurs and processing new data in the next cycle. However, if failures occur in several consecutive cycles, this is classified as a fault. The maximum allowable number of failures before a fault occurs,  $N$ , is determined by the nature of the ACS and the available time and processing speed reserves within a single software cycle and can be derived from the threshold recovery time.

A fault is defined as the consecutive occurrence of failures over  $n$  execution cycles of the program. The threshold time that distinguishes a fault from a failure is equal to the duration of  $n$  processing cycles. For software without recovery, which will be used for comparison,  $n = 1$ .

Experience shows that the operation of the software in each cycle is independent of the results of previous executions, and the input data are updated in each cycle. Let us assume that the probability of failure in a single execution cycle of the program is constant and equal  $p$ . We will calculate the probability of software failure over a sufficiently large but finite number of cycles.

For this calculation, we use a simple homogeneous Markov chain, as shown in Fig. 3.

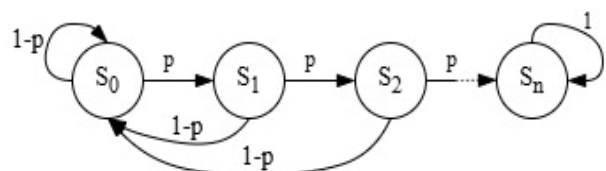


Fig. 3. Homogeneous Markov Chain,  $n > 1$

The state  $S_0$  corresponds to the normal execution of the current software operation cycle. If the first failure occurs at  $N_f$ , the system transitions to

state  $S_1$ . The probability of this transition is  $p$ . In the next cycle, a second failure may occur with probability  $p$  (transitioning to state  $S_2$ ), or with probability  $1 - p$ , no failure will occur, and the system will return to state  $S_0$ . A fault corresponds to state  $S_n$ , which the software reaches after  $n$  consecutive failures. Transitions from state  $S_n$  to other states are not possible. We assume that once the software reaches state  $S_n$ , it remains in that state with probability 1. For the case where  $n = 1$  (software without recovery), the Markov chain has the structure shown in Fig. 4.

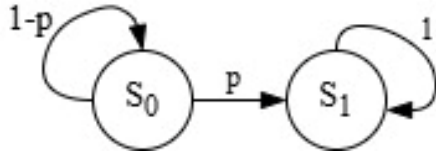


Fig. 4. Homogeneous Markov Chain,  $n = 1$

The transition probabilities between states in these Markov chains are described using transition probability matrices. The matrices for the cases  $n = 1$ ,  $n = 2$ ,  $n = 3$ , and  $n = 4$  are provided below.

$$R_1 = \begin{vmatrix} 1-p & p \\ 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$R_2 = \begin{vmatrix} 1-p & p & 0 \\ 1-p & 0 & p \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$R_3 = \begin{vmatrix} 1-p & p & 0 & 0 \\ 1-p & 0 & p & 0 \\ 1-p & 0 & 0 & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$R_4 = \begin{vmatrix} 1-p & p & 0 & 0 & 0 \\ 1-p & 0 & p & 0 & 0 \\ 1-p & 0 & 0 & p & 0 \\ 1-p & 0 & 0 & 0 & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

The initial probability is  $P_{S_0}^0 = 1$ . For all other states, the initial probabilities are zero.

The software failure probability  $P$  represents the probability of transitioning from the initial state  $S_0$  to state  $S_1$ . This corresponds to the conditional probability  $P$ , which is found in the last column of the first row (the upper-right corner of the transition probability matrix). At the beginning of the software

operation (in the «zero» cycle), this probability is zero. To determine the probability of failure at the  $N$ -th cycle, the transition matrix must be raised to the  $N$ -th integer power  $R_1$ .

For practical calculations, instead of using 1, a probability value of  $P(S_0)^0 = 0.999$  can be used. This probability is reached at a certain critical cycle number  $N_{crit}$ , meaning that a software failure will occur at a cycle number less than or equal to  $N_{crit}$ . The calculations were performed for  $N = 10^{10}$  independent cycles.

The calculation of Markov matrices allows for the construction of dependencies between the software failure probability, the cycle number, and the failure probability per cycle. For practical applications, it is more convenient to use inverse dependencies of failure probabilities leading to a fault as a function of the cycle number.

For the considered cases, Table 1 provides the values of the coefficients ( $a$  and  $b$ ) for  $n = 1$ ,  $n = 2$ ,  $n = 3$ , and  $n = 4$ , using the inverse dependency equation of the form:  $p(n) = a(n)N + b(n)$

Calculations using this equation allow for determining the probability of failure in a single cycle, which is required to achieve the desired maximum number of execution cycles  $N$  before failure.

Table 1 shows the values of the coefficients ( $a$  and  $b$ ) for predicting the maximum number of software execution cycles  $N$  before failure depending on the probability of failure per cycle  $p$  and the maximum permissible number of failures  $n$  before failure.

Table 1  
Values of the coefficients for predicting the number of software execution cycles

$n$	$a$	$b$
1	-7,69E-03	1,50E-01
2	-7,76E-04	1,15E-01
3	-9,54E-05	1,05E-01
4	-1,25E-05	1,02E-01
5	-1,67E-06	1,01E-01

To increase the number of failure-free software execution cycles, it is necessary to either reduce the probability of failure per cycle or increase the maximum allowable number of failures before a fault. Table 1 presents the case for  $n = 5$ , obtained through an approximation of the calculated results.

To convert the number of cycles into program execution time and mean time to failure (MTTF), it is sufficient to multiply the cycle number by the cycle duration. The ACS software for thermal destruction of solid waste employs a recovery mechanism with a maximum allowable number of failures  $n = 3$ . The duration of a single cycle is 0.1 seconds.

During software operation, individual failures occurred at the following cycle numbers: 54, 106, 156, 208. The average interval between failures is  $N_f = 52$ . The average probability of failure per cycle is  $p = 0.192$ . Using the given formula and values from Table 1, we find that  $N_{crit} = 9 \times 10^5$ , which corresponds to 25 hours of software operation.

This significantly increases the maximum failure-free operation time of the software with recovery, compared to software without recovery.

### Conclusions

The application of a recovery mechanism makes it possible to develop software with a specified level of reliability by adjusting the maximum allowable number of failures before a fault occurs.

The implementation of software recovery support is most conveniently achieved through the use of a dedicated library. Such a library serves as an intermediary between application software, the operating system, and automation hardware. At the library level, the processing cycle is organized, including the reception of input data and the issuance of control actions.

In addition, the library may contain auxiliary functions, such as archiving and logging, which provide solutions to two important tasks.

First, it enables the identification of specific input data combinations that lead to failures, which in turn facilitates the correction of errors in the software.

Second, it allows for the determination of the failure-free operating time of the software, making it possible to take preventive measures to eliminate detected errors before a fault occurs.

### References

1. Ryzhkov, S.S. and Markina, L.M., 2007. Experimental studies on the utilization of organic waste by multiloop circulation pyrolysis. *Scientific Journal of the National University of Shipbuilding*, (5), pp.100–106.

2. Kondratenko, Y.P. and Kozlov, O.V., 2011. Analysis of task complexes and control coordinates of the ecopyrogenesis technological

process. *Technical News*, 1(33), 2(34), pp.13–16. DOI [https://doi.org/10.1007/978-3-642-30433-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30433-0_18)

3. Kondratenko, Y.P. and Kozlov, O.V., 2012. Functional structure and computer components of a control system for a multiloop pyrolysis plant. *Bulletin of the National University of Shipbuilding*, 2011 edition. Mykolaiv: NUS, pp.413–423.

4. Brooks, F.P., 1995. *The Mythical Man-Month: Essays on Software Engineering*. Anniversary Edition. Chapel Hill: University of North Carolina. Addison-Wesley, 304p.

5. Maysyan, I.G., 2003. Methods for improving the reliability of software in automated control systems. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*, 2(20), pp.117–120.

6. Maksymov, M.V., Maysyan, I.G. and Kalnev, L.L., 2006. Determination of the probability distribution of software failures in ACS TP. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*, 2(26), pp.101–104.

7. Butenko, O.V., Maksymov, M.V., Demidenko, V.E. and Brunetkin, O.I., 2019. Method for solving complex interpretation problems to address the inverse task of determining fuel composition. *Ship Power Plants: Scientific-Technical Collection*, (39), pp.30–42. Available at: [http://seu.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/2019\\_39.pdf](http://seu.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/2019_39.pdf) [Accessed 9 Jan. 2025].

8. Maksymov, M.V., Brunetkin, A.I. and Bondarenko, A.V., 2013. Model and method for determining the conditional formula of hydrocarbon fuel during combustion. *Eastern-European Journal of Advanced Technologies*, 6(8)(66), pp.20–27.

9. Patent of Ukraine No. 120216, 2019. Device for determining the composition of combustible gas during its combustion. Filed 22 Dec. 2017, Published 25 Oct. 2019. *Bulletin*, (20).

10. Jang, J.S.R., Sun, C.T. and Mizutani, E., 1996. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hal

## Вдосконалення автоматизації управління термічним знищенням твердих побутових відходів через відновлення програмного забезпечення після збоїв

К. Г. Кіркопуло<sup>1</sup>, В. М. Тонконогий<sup>1</sup>, М. М. Максимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет «Одеська політехніка»

<sup>2</sup>Національний університет «Одеська Морська Академія Інститут Військово-Морських Сил»

**Анотація.** У статті представлені результати вдосконалення автоматизації управління процесом термічного знищення твердих побутових відходів (ТПВ) шляхом відновлення програмного забезпечення після збоїв. Запропоновано функціональну структуру та обрано технологічні параметри (як керовані координати) для ієрархічної автоматичної системи управління (АСУ) процесом термічного знищення ТПВ. Для моделювання параметрів збоїв та відмов у циклічному функціонуванні програмного забезпечення використано однорідний Марковський ланцюг. Застосування АСУ із запропонованою структурою відновлення забезпечує надійність програмного забезпечення шляхом регулювання порогового значення кількості збоїв. Впровадження цього підходу зменшує забруднення довкілля у стаціонарних режимах із відомим складом сировини, у динамічних режимах із зміною складу матеріалів, а також під час запуску піролізних установок. Запропонований підхід підвищує точність контролю ключових технологічних параметрів, надійність роботи та економічну ефективність.

**Ключові слова:** автоматизація, автоматична система управління, термічне знищення, тверді побутові відходи, відновлення, програмне забезпечення, збій, Марковський ланцюг, довкілля.

Отримано 20.01.2025

### About the authors



**Katerina G. Kirkopulo**, Doctor of Philosophy (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Information Technology, Engineering and Design, Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: kirkopulo.k.g@op.edu.ua; ph.: +38 093 411 1013

**Кіркопуло Катерина Григорівна**, доктор філософії (Ph.D.), доцент кафедри інформаційних технологій проектування та дизайну, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: kirkopulo.k.g@op.edu.ua; тел. +38 093 411 1013

**ORCID:** 0000-0001-5570-5989



**Vladimir M. Tonkonogyi**, Dr. of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Digital Technologies, Design and Transport, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., 1, Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: vmt47@ukr.net; ph.: +38 067 484 1287

**Тонконогий Володимир Михайлович**, д. т. н., професор, директор інституту цифрових технологій, дизайну та транспорту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: vmt47@ukr.net; тел. +38 067 484 1287

**ORCID:** 0000-0003-1459-9870



**Maksym M. Maksymov**, senior researcher, NDC of the Armed Forces of Ukraine "State Oceanarium" of the Institute of the Naval Forces, National University "Odesa Maritime Academy"; 8, St. Didrichson, Odesa, Ukraine.

E-mail: maximov.agro@gmail.com; ph.: +38 093 970 2121

**Максимов Максим Максимович**, старший науковий співробітник, НДЦ ЗСУ «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил, Національний університет «Одеська морська академія»; вул. Дідріхсона, 8. Одеса, Україна.

E-mail: maximov.agro@gmail.com; тел. +38 093 970 2121

**ORCID:** 0000-0002-5626-5265

# Computer-integrated system for controlling the wear resistance of heat exchange tubes of solid fuel boilers with the distribution of coal flows between control influences

M. V. Grishyn, O. S. Tarakhtiy, G. Io. Halanter

National University "Odesa Polytechnic

**Abstract :** This article presents the development of a computer-integrated control system for optimizing the wear resistance of heat exchange tubes in solid fuel boilers. The proposed model accounts for the quality and abrasiveness of solid fuel, which significantly impacts boiler efficiency and maintenance costs. The system integrates two independent monitoring channels: one assessing the chemical composition of the fuel and the other analyzing the abrasive content in flue gases. By dynamically adjusting fuel distribution, the system minimizes erosion of heat exchange surfaces, prolongs the operational lifespan of boiler components, and reduces downtime. Simulation results confirm the system's effectiveness in enhancing thermal efficiency and operational stability. The proposed approach offers a viable solution for improving the reliability and sustainability of solid fuel energy systems.

**Keywords :** solid fuel steam boiler , quality of solid fuel , computer-integrated control system , wear resistance of heat exchange surfaces , abrasiveness of solid fuel

## Introduction

Coal is the second largest source of primary energy after oil and occupies almost 26% of the world energy market. In addition, coal is of primary importance in the production of electricity, cement and steel. Approximately two-thirds of the world's coal production is spent on electricity production and about 15% is used in the metallurgical industry [1-2].

The total annual world coal production is 7,813 million tons. The main world leaders in coal production are: China, India, the USA, Indonesia and Australia. The top ten largest coal consumers are also headed by China, followed by India, the USA, Germany, Turkey and South Africa. The main feature of this type of fuel is that approximately 80% of the coal produced is used in the country of its production, in contrast to natural gas – 68% and oil – 42%. This fact can be explained by the lower energy density of coal compared to gas and oil, as well as significantly higher costs for its transportation [3-5].

The main problem of coal use is slag formation and ash deposition, as well as the process of dust erosion of the tube surfaces of steam boilers and auxiliary thermal equipment [6,7].

However, despite the above-mentioned "disadvantages", the role and significance of coal in global industry remains very significant.

## 1. Problem justification

The problem of wear resistance of the surfaces of heat exchange tubes of solid fuel steam boilers of domestic thermal power plants is very important, since it determines the reliability and duration of uninterrupted operation of power equipment.

Premature repair of elements of this nature requires considerable time and, especially in today's conditions, can significantly affect the stability of the power system of our country [8,9].

To date, computer-integrated control systems (CICS) of power units of thermal power plants use models that take into account the condition of the surfaces of heat-exchange tubes of steam boilers. The arguments of the model are the characteristics of the quality of solid fuel provided by the supplier of this fuel. However, in fact, the service life of screen and heat-exchange tubes differs significantly from the term obtained during modeling. This fact can be explained by the discrepancy between the abrasive component of coal at the time of unloading to the warehouse and its amount formed during coal combustion [8,9].

The solution to this problem is possible by improving the load control system of a solid fuel steam boiler with two independent channels for monitoring the condition of the surfaces of the heat exchange tubes of the boiler unit. In this case, one channel will detect the compliance of the chemical composition of the fuel with the specified one, and the other will detect the abrasive component in the flue gases after coal combustion.

Table 1

Solid fuel consumption at TPPs

TPP	Electrical power, MW	Fuel consumption, kg/s	Consumption million tons/year
$A_1$	3600	290.32	9.16
$A_2$	3600	290.32	9.16
$A_3$	2400	193.55	6.10

Therefore, the purpose of this article is to improve the computer-integrated control system for the wear resistance of heat exchange tubes of a solid fuel steam boiler by introducing the distribution of solid fuel flow between control influences, unloading conditions, and solid fuel quality analysis .

## 2. KISU model of wear resistance of heat exchange surfaces

The first and main problem of wear resistance of heat exchange surfaces is the fact that the actual quality of solid fuel and the quality characteristics specified in the transport documents do not match. The lack of proper coal quality control forces the personnel of thermal stations to use fuel of inadequate quality, which leads to such negative consequences as abrasive wear of the surfaces of heat exchange pipes.

Previous studies show that it is possible to control the wear resistance of heat exchange surfaces by timely accounting for the abrasive impurity contained in the solid fuel. Such a system can be based on the distribution of the solid fuel flow between control influences and unloading conditions, as well as checking the quality of coal received from suppliers [10].

### 2.1. Transport problem of solid fuel supply

To construct the transport problem, Zaporizhia, Vuglehirska, and Burshtynska TPPs were selected, which operate on solid fuel and are respectively designated  $A_1$ ,  $A_2$ , and  $A_3$ .

Suppliers are mines of the Donetsk coal basin (except Volynvugol and Lvivvugol ). The case of a coal shortage on the domestic market was also taken into account. In this case, South Africa was chosen as the coal supplier.

The distances from the ports of the Odesa region (TIS port and Pivdenny port ) to the selected TPPs are, respectively: to Zaporizhzhia - 555 km, to the city of Svitlodarsk (Vuglehirska TPP) - 845 km, and to the city of Burshtyn - 764 km.

The cost of transporting coal from the mines of the Donetsk Basin is shown in Table 2. Taking into account the relative cheapness of coal from South Africa (2,724.96 UAH per ton), as well as the location of the port of Pivdenny in relation to the selected thermal power plants, the scheme of importing coal from South Africa turns out to be cheaper and more profitable in terms of procurement.

The transport problem was solved taking into account the annual needs of the thermal power plant and the annual production of the selected mines [11].

Table 2

Cost of transporting coal per year from each mine, million UAH.

127.1801847	45.53740265	25.05064244	0.525	$B_1$	Volyn coal
744.1657721	733.8540063	112.856549	2.9655	$B_2$	Lviv Coal
66.7066685	19.85776548	242.3418564	0.998	$B_3$	Myrnograd-coal
101.2467087	34.75224867	350.532524	1.4165	$B_4$	Selydiv-coal
185.097695	65.47338679	610.4285685	2.5483	$B_5$	Dobropillya town
62.04281552	6.4617811	8.502343553	0.2515	$B_6$	Sosnivka
61.55068896	19.52414327	221.7148473	0.8565	$B_7$	Vugledar town
71.45735598	80.15046498	156.475962	0.9	$B_8$	Alexandria city
628.2408455	585.0998432	3084.581662	13.9575	$B_9$	Pavlohrad city
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$Z$	$\Sigma A_n = \Sigma B_m = 24.42$	

The assessment of coal transportation for three selected TPPs (Zaporizhzhia, Vuglehirska, Burshtynska) showed that coal imports from South Africa, despite its lower quality and transportation time, can be a significant support in case of fuel shortage. The study shows that even taking into ac-

count the additional costs of coal enrichment to reduce ash content, it is still economically beneficial due to savings from reduced equipment wear. In addition, the optimal transportation plan determines the most efficient distribution of coal from different mines and the South African supplier to the TPP.

**2.2. Mathematical model of the parametric scheme of a solid fuel boiler**

The mathematical model is built on the basis of equations (2.1) and a parametric scheme (Fig. 1).

$$ZTPP = \begin{cases} W = W_{enrich}(Ad, V_{purch}) \\ L = L_{log}(x, V_{purch}) \\ C = C_{TPP}(Ad, T_{equip}) \\ T = T_{equip}(Ad, V_{purch}) \\ V = V_{purch}(Ad) \end{cases} \quad (2.1)$$

where  $W_{enrich}(Ad, V_{purch})$  – a function describing the costs associated with the fuel enrichment process, depending on  $Ad$  and the purchase volume  $V_{purch}$ ;

$L_{log}(x, V_{purch})$  – a function describing the costs associated with logistics, depending on the volume of purchase ( $V_{purch}$ );

$V_{purch}(Ad)$  – function of determining the required volume for purchase taking into account the abrasiveness of the fuel;

$C_{TPP}(Ad, T_{equip})$  – a function describing the costs of a thermal power plant associated with environmental pollution, repair and replacement of equipment due to the operation of highly abrasive fuel, depending on the operation time before an urgent stop for repair;

$T_{equip}(Ad, V_{purch})$  is a function for calculating the time of current operation before repair.

Taking into account the system of equations (2.1) and the CISU scheme, the system of equations of the mathematical model took the form:

$$\begin{cases} M_{sl} = M_f a_1 + M_{fa} a_2 + M_{Ad} a_3; \\ M_{loss} = M_f b_1 + M_{fa} b_2 + M_{Ad} b_3; \\ V_{res} = M_f c_1 + M_{res} c_2 + M_{en} c_3; \\ T_{op} = M_f d_1 + M_{fa} d_2 + M_{Ad} d_3 + \\ \quad + M_{res} d_4 + M_{en} d_5; \\ N = M_f e_1 + M_{res} e_2 + M_{en} e_3. \end{cases} \quad (2.2)$$

where are  $a_n, b_n, c_n, d_m, e_n$  constant coefficients,  $n = \overline{1,3}; m = \overline{1,5}$ ;

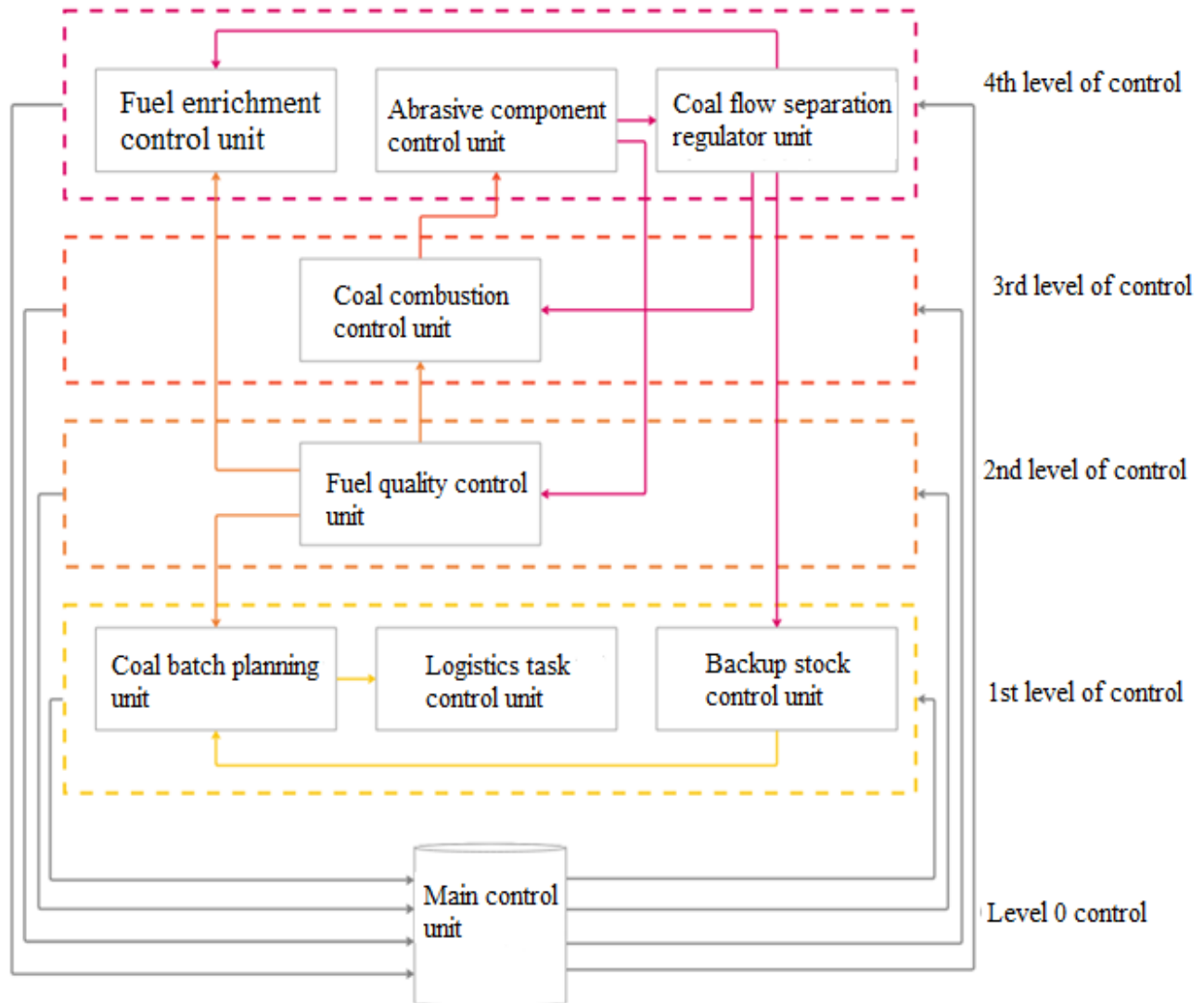


Fig. 1. Scheme of the KISU wear resistance of heat exchange surfaces of a solid fuel boiler

$M_f$  – fuel consumption, kg/h;  
 $M_{en}$  – consumption of enriched fuel, kg/h;  
 $M_{res}$  – reserve fuel consumption, kg/h;  
 $M_{f\_a}$  – ash consumption, kg/h;  
 $M_{Ad}$  – fuel ash content, %;  
 $M_{sl}$  – consumption of the total amount of ash-slag pulp, kg/h;  
 $T_{op}$  – operating time before replacing heat exchanger tubes, hours;

$M_{loss}$  – carbon losses due to the discrepancy between the declared and actual ash content, which necessitates enrichment or use of reserves, kg/h;  
 $V_{res}$  – fuel stock in reserve warehouse, t;  
 $N$  – power of the station, MW.

The parametric diagram of a solid fuel steam boiler is built based on three main indicators: the current volume of solid fuel reserves, the operating time of heat exchange surfaces before repair or replacement, and the current flow of fly ash (Fig. 2).

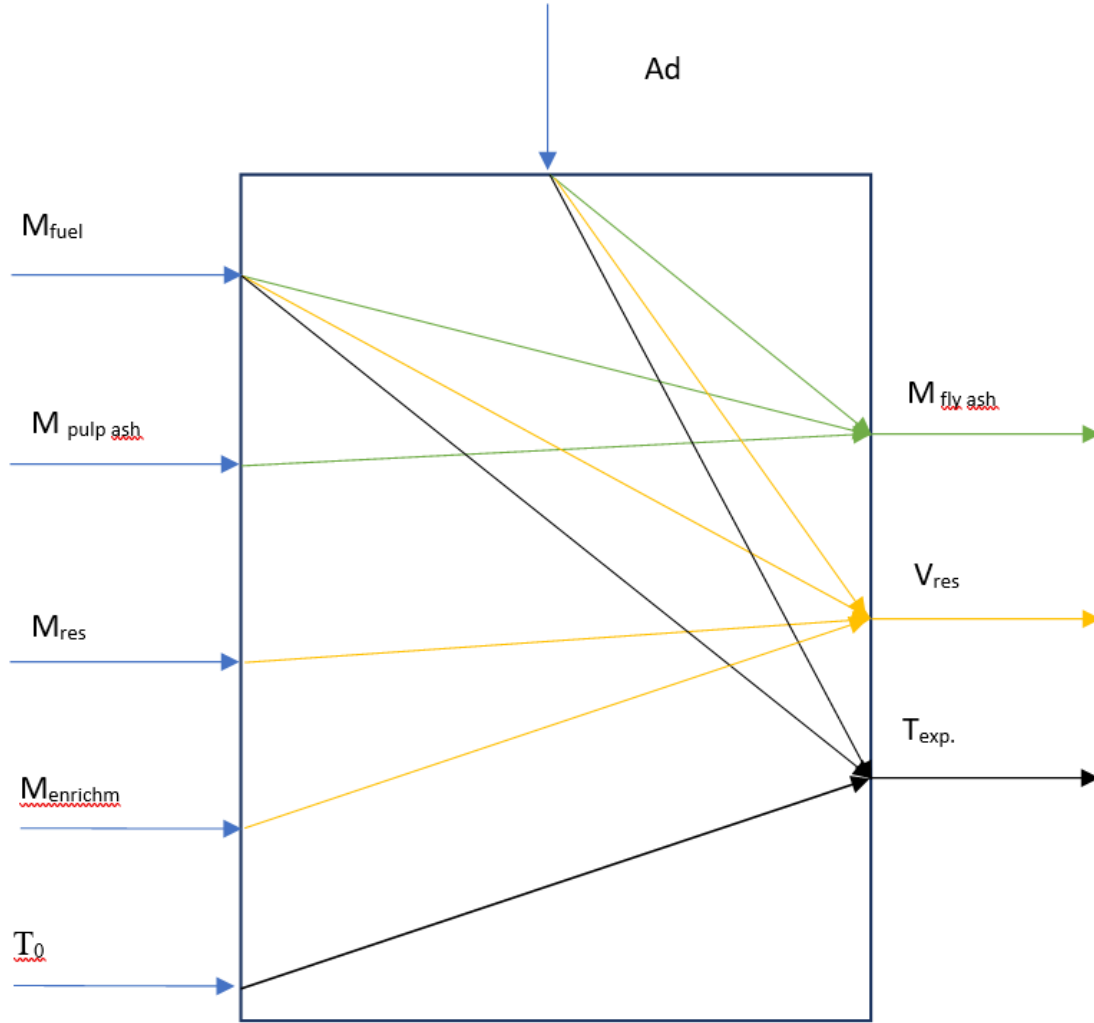


Fig. 2 Adapted parametric diagram of a solid fuel steam boiler

According to the parametric diagram of the boiler unit shown in Fig. 2, the system of equations (2.1) will take the form:

$$\begin{cases} M_{f\_a} = M_{sl} - F_{f\_a}(M_f, A_d) \\ V_{res} = V_0 - F_{en}(M_f, A_d, M_{en}) \\ T_{op} = T_0 - F_T(M_f, A^d, ) \\ M_{ash} - M_{sl} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

where  $M_{ash}$  is the total ash consumption.

To study changes in the system over time, differential equations were constructed based on systems (2.2) and (2.3), which are given below:

$$\begin{cases} \frac{dM_{Ad}}{d\tau} = (M_{ash} + dM_{ash}) - \\ \quad - (M_{sl} + dM_{sl}) \\ \frac{dM_{Ad}}{d\tau} = dM_{ash} - dM_{sl} \end{cases} \quad (2.4)$$

Thus, the presented mathematical model of a steam boiler describes the relationships between the main parameters that characterize the wear resistance of heat exchange surfaces, namely: solid fuel and ash consumption, reserve stocks of solid fuel, and operating time before repair of heat exchange surfaces.

**2.3. Fuzzy controller for controlling the wear resistance of heat exchange surfaces**

To build a fuzzy controller for controlling the wear resistance of heat exchange surfaces, the following classification of solid fuel according to its quality was adopted (Table 3). Coal quality classes are divided according to the conditional clustering presented in [12] and can be classified as "Ideal", "Good" or other based on test results.

Table 3  
Classification of solid fuels by degree of abrasiveness

<i>Ad</i>	Fuel quality class
0-5%	Ideal
5-9%	Good
9-16%	Normal
16-30%	Unsatisfied
30+%	Bad

Based on the defined coal quality classes, control influences were established that correspond to the defined solid fuel quality classes (Table 4).

Table 4  
Correspondence of control influences to coal quality classes

<i>coal quality class</i>	<i>controlling influence</i>
Ideal	Transfer to reserve warehouse.
Good	Use for burning.
Normal	Partially enrich or mix with reserve.
Unsatisfied	Enrich, or enrich and mix with reserve.
Bad	Mix with the reserve, or use only the reserve.

Based on the defined solid fuel quality classes and their corresponding control influences, the proposed regulation scheme is shown below in Fig. 3.

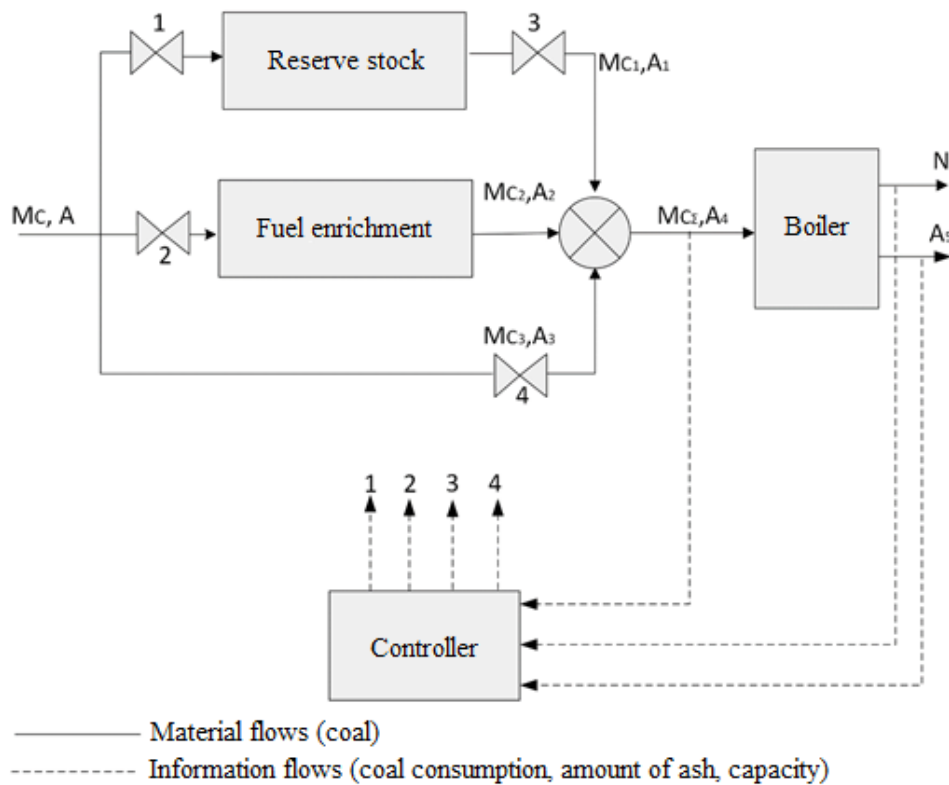


Fig. 3 Scheme of regulation of wear resistance of heat exchange surfaces

The next step was to build a fuzzy controller control system block, which is shown in Fig. 4.

The input values for the fuzzy controller were selected as the abrasiveness of coal (*Ad*) and the fullness of the reserve warehouse. As the control influence of the controller, the distribution of the coal flow by fractions in the following directions was taken: replenishment of the reserve warehouse

(store) directly for burning (burning), enrichment (concentrator) and rejection of the current coal and use of the reserve (reserve \_ out). The fuzzification of the variables *Ad* and the volumes of the reserve warehouse is shown in Fig. 5.

The control problem condition presented in Fig. 5 corresponds to the coal classes given in Table 3 and will influence the choice of control influence.

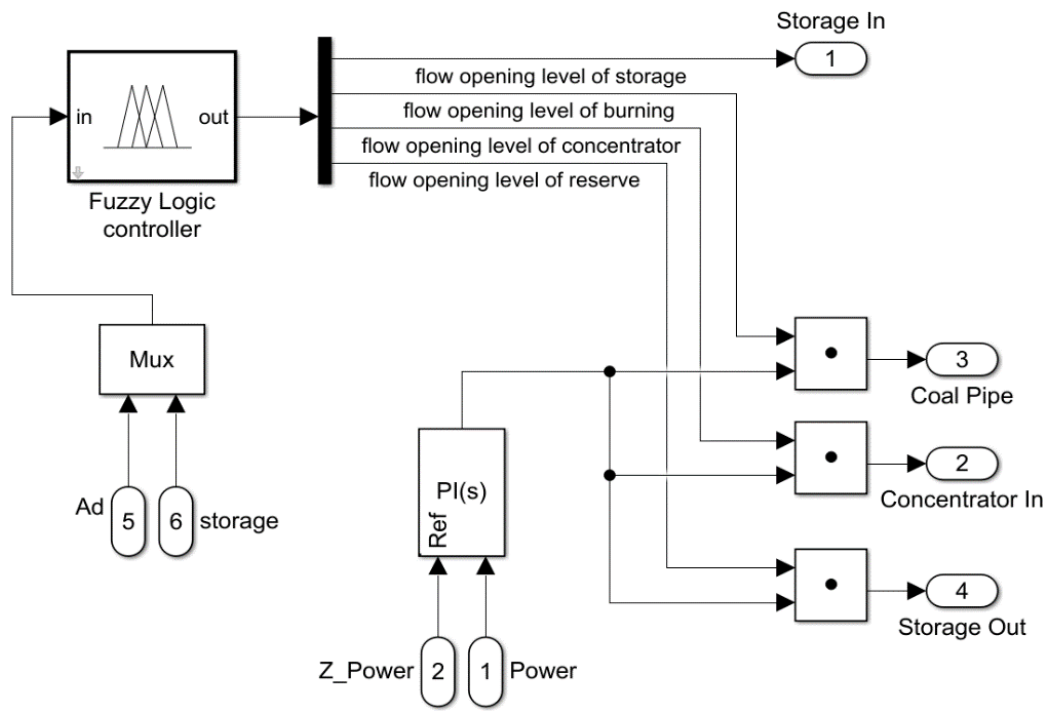


Fig. 4 Scheme of the control unit of the fuzzy controller

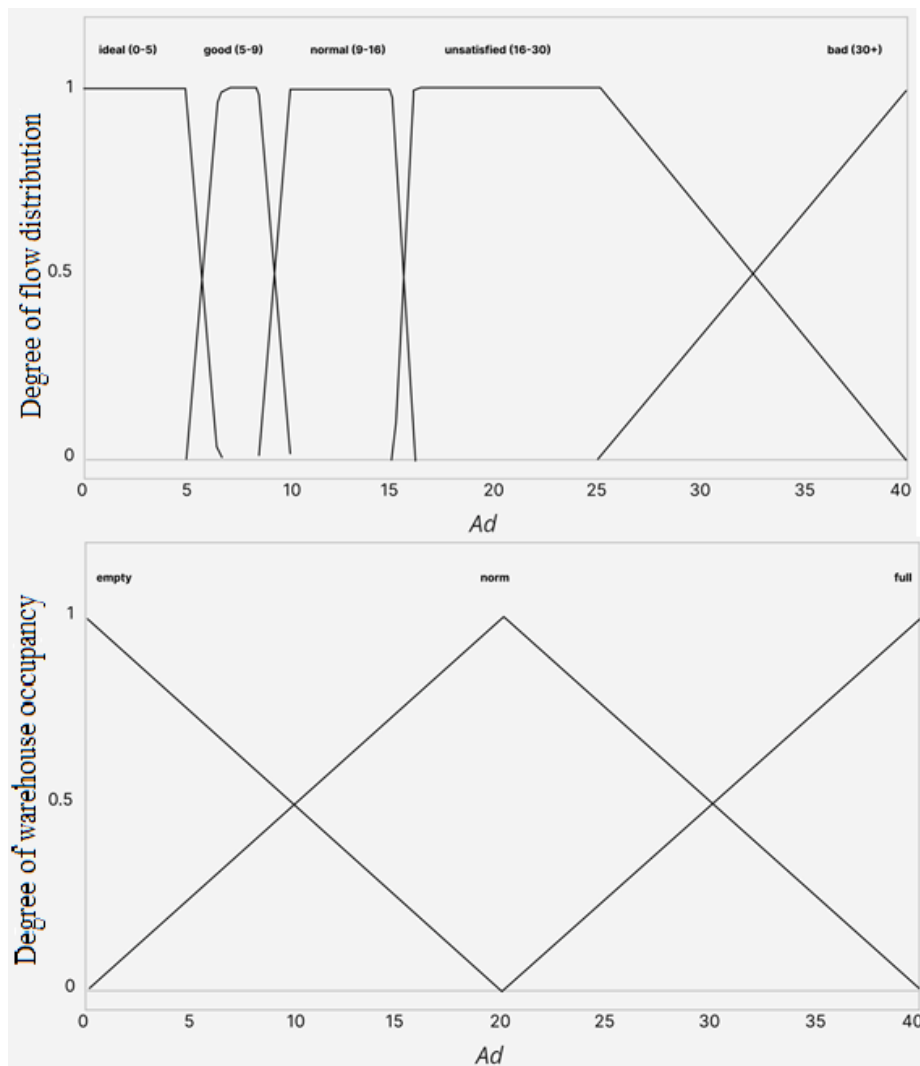


Fig. 5 Fuzzification of variables  $Ad$  and reserve stock volumes

The flow distribution rules are programmed as follows:

1. if (Ads is ideal (0-5)) and (store is full) then (store is small)( burning is large)(concentrator is small)(reserve\_out is small);
2. if (Ads is ideal (0-5)) and (store is norm) then (store is normal)( burning is normal)(concentrator is small)(reserve\_out is small);
3. if (Ads is ideal (0-5)) and (store is empty) then (store is large)( burning is normal)(concentrator is small)(reserve\_out is small);
4. if (Ads is good (5-9)) and (store is full) then (store is small)(burning is large)(concentrator is small)( reserve\_out is small);
5. if (Ads is good (5-9)) and (store is norm) then (store is small)(burning is large)(concentrator is small)( reserve\_out is small);
6. if (Ads is good (5-9)) and (store is empty) then (store is normal)(burning is normal)(concentrator is small)( reserve\_out is small);

7. if (Ads is norm (9-16)) and (store is full) then (store is small)(burning is large)(concentrator is small)( reserve\_out is small);

8. if (Ads is norm (9-16)) and (store is norm) then (store is small)(burning is large)(concentrator is small)( reserve\_out is small);

9. if (Ads is norm (9-16)) and (store is empty) then (store is small)(burning is large)(concentrator is normal)( reserve\_out is small);

10. if (Ads is unsatisfied (16-30)) then (store is small)(burning is normal)(concentrator is normal)( reserve\_out is normal);

11. if (Ads is bad (30-40)) then (store is small)(burning is small)(concentrator is normal)( reserve\_out is large).

And the condition of the problem shown in Fig. 6 and Fig. 7 will affect the degree of replenishment and use of the TPP reserve.

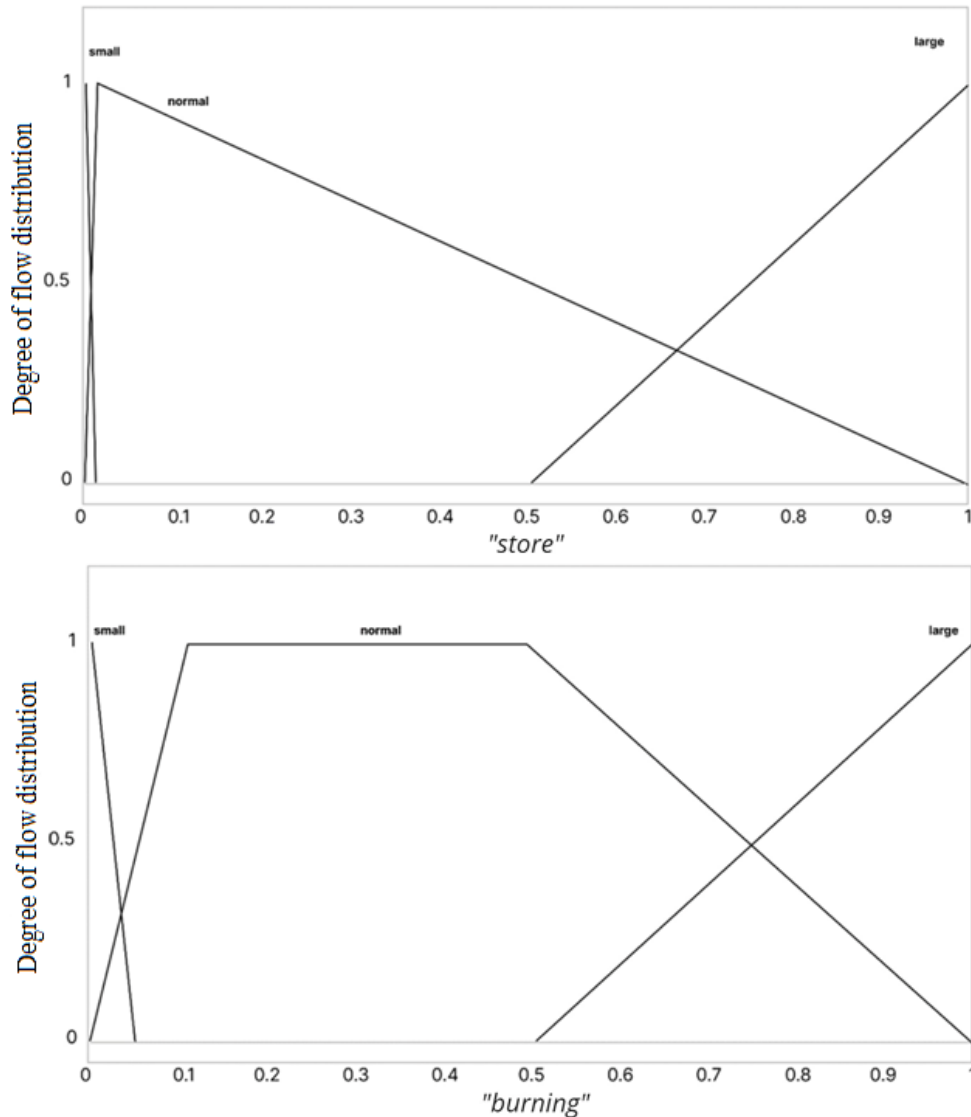


Fig. 6 Defuzzification of the control influences “store” and “burning”

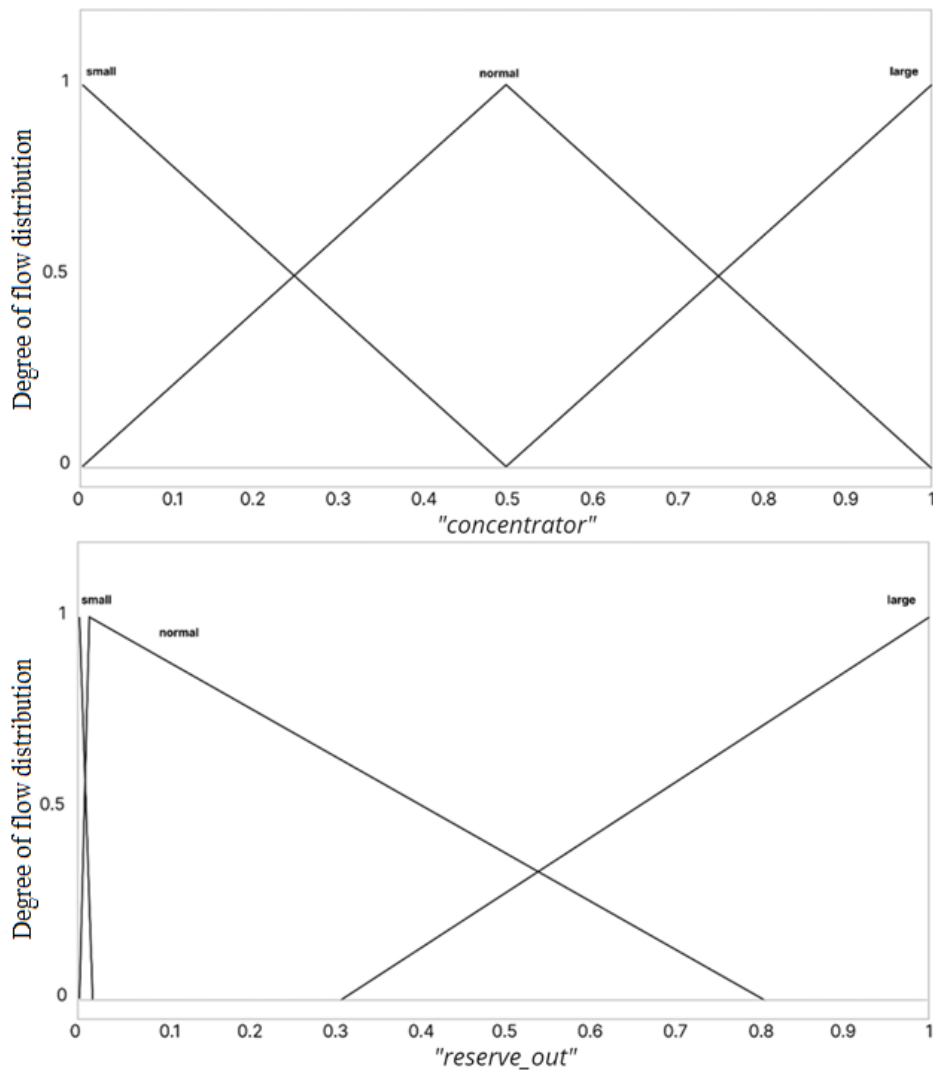


Fig. 7 Defuzzification of the control influences "concentrator" and "reserve\_out"

Using "Rule Viewer" the settings of the programmed rules were checked. The results of the check are presented below:

- at  $Ad = 5\%$ , and the reserve warehouse occupancy is 74.7%: the reserve warehouse occupancy rate is 0.438; burning – 0.561;
- at  $Ad = 0.238\%$ , and the reserve warehouse occupancy is 26.1%: the reserve warehouse occupancy rate is 0.501; burning – 0.5;
- at  $Ad = 7.2\%$ , and the reserve warehouse occupancy is 71.8%: the reserve warehouse occupancy rate is 0.0161; combustion – 0.814;
- at  $Ad = 8.81\%$ , and the reserve warehouse filling rate is 10%: the reserve warehouse filling rate is 0.418; combustion – 0.511; enrichment – 0.35;
- at  $Ad = 15.8\%$ , and the reserve warehouse is 100% full : the reserve warehouse filling degree is 0.0146; combustion – 0.36; enrichment – 0.285;
- at  $Ad = 39.1\%$ , and the reserve storage is 100% full : the reserve storage filling rate is 0.0175; combustion – 0.0183; enrichment – 0.331; reserve fuel use – 0.673.

#### 2.4. Simulation of the operation of a fuzzy controller at different degrees of fuel abrasiveness

The developed fuzzy controller works by fractional distribution of solid fuel flow directions. Of significant interest is the operation of the controller at different levels of abrasive materials contained in coal.

Modeling of the regulator operation was carried out for cases when  $Ad = 35\%$  at a warehouse occupancy of 90% and when  $Ad$  continuously increases from 14% to 35% at a warehouse occupancy of 100%.

The case with a constant value of  $Ad = 35\%$  (Fig. 8 and Fig. 9) shows that most of the solid fuel flow to the furnace will come from the reserve, while the delivered coal will be distributed between the furnace and enrichment.

For the case of a variable value of  $Ad$ , namely a constant increase from 14% to 35%, the scheme and results are shown in Fig. 10 and Fig. 11, respectively.

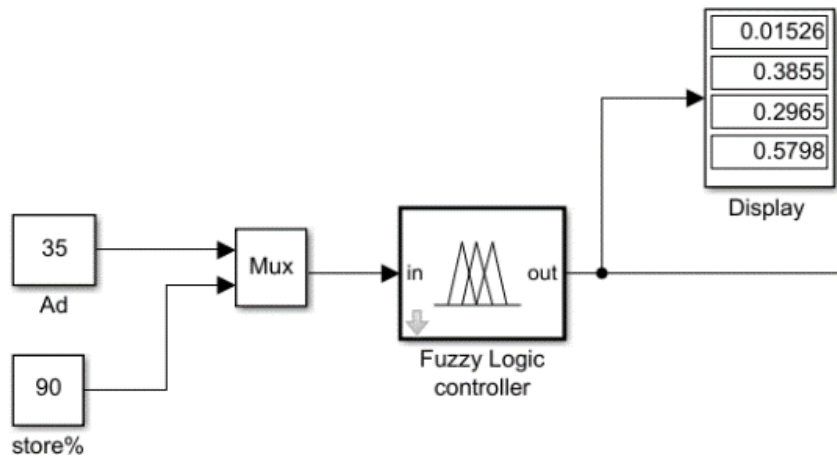


Fig. 8 Coal flow control scheme with a constant abrasive component of 35%

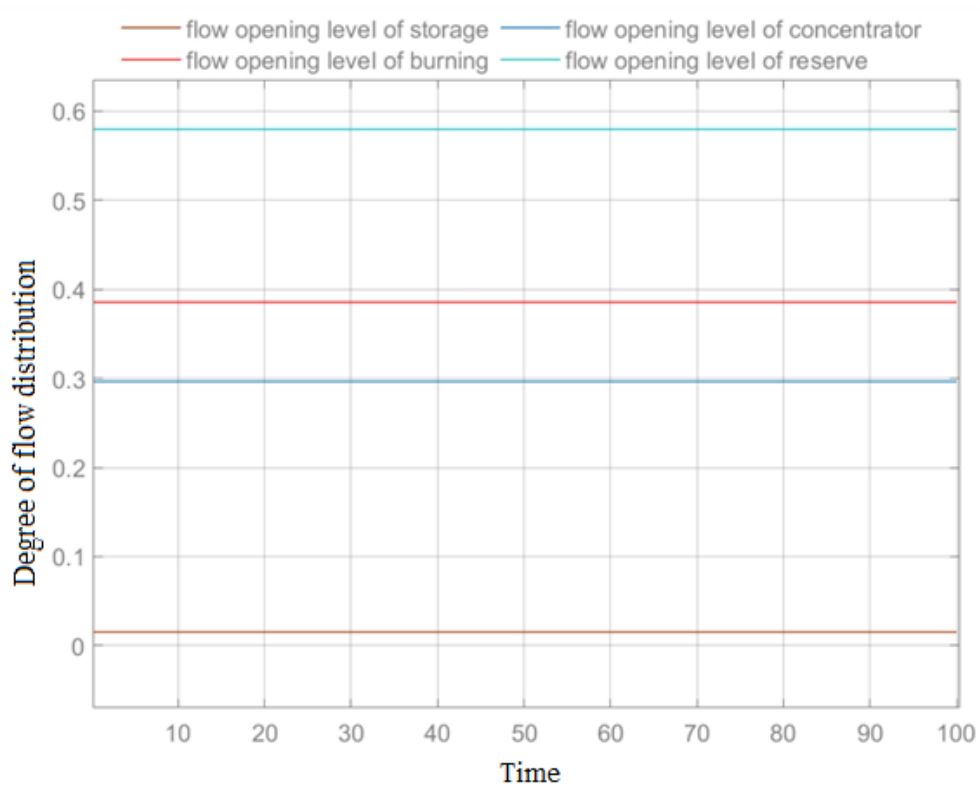


Fig. 9 Graph of results for the scheme from Fig. 8

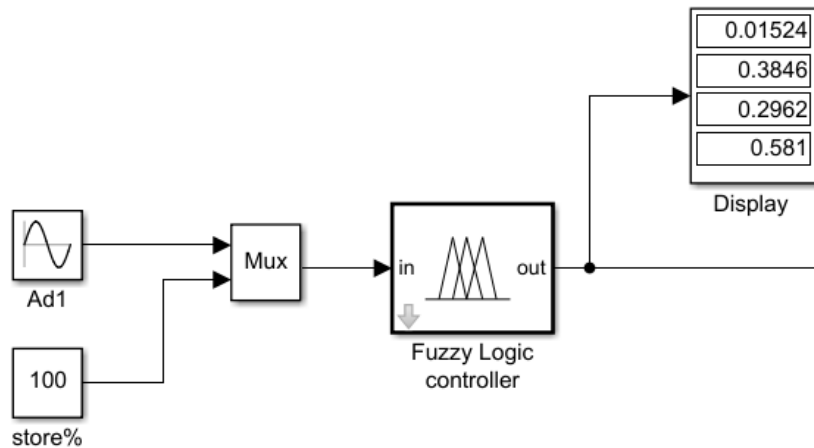


Fig. 10 Coal flow control scheme with increasing abrasiveness from 14% to 35

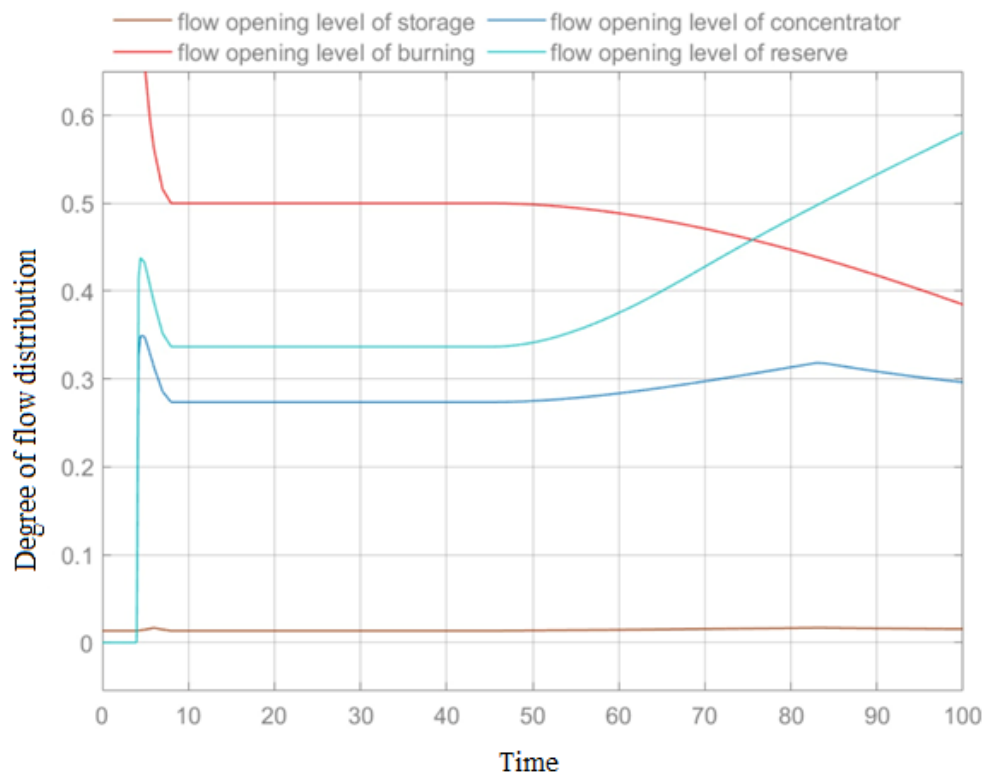


Fig. 11 Results graph for the scheme from Fig. 10

The results from Fig. 11 can be commented on as follows:

- At the initial  $Ad = 14\%$  (system operating time  $t_0 = 0$  s), almost the entire fuel flow is directed to combustion.

- With the system operating time  $t_1 = 50$  s,  $Ad$  changes to 24%. As a result, the following distribution of the fuel flow will be the controlling influence - half of the thermal coal is sent for combustion, mixing with reserve fuel, and the rest for enrichment.

- At the end of the experiment ( $t_2 = 100$ ) at  $Ad = 35\%$ , the largest share of the burned fuel will be thermal coal from the reserve. In this case, coal from the supplier will be partially burned and partially sent for enrichment.

From the results of the simulation, it can be concluded that with a consistent increase in the content of abrasive material in solid fuel, the flow rate of reserve fuel increases, and the flow rate of ash fuel decreases. Thus, this fact can contribute to reducing the erosion rate of heat exchange surfaces of the steam boiler from the flow of abrasive material during fuel combustion.

### Conclusion

This article considers the problem of wear of heat exchange tubes of solid fuel steam boilers and proposes a method for improving their wear resistance using a computer-integrated control system. The developed mathematical model allows taking

into account variable parameters of fuel quality, in particular its abrasiveness, which significantly affects the duration of operation of boiler equipment.

The simulation modeling confirmed the effectiveness of the proposed system, which allows to reduce wear of heat exchange surfaces, optimize fuel consumption and reduce operating costs. The use of two independent fuel quality control channels contributes to more precise regulation of the combustion process and minimizes the negative impact of low-quality fuel.

The results obtained can be used to further improve automatic control systems for boiler units, which will contribute to increasing the efficiency of thermal power plants and reducing their environmental impact.

### References

1. Samuel L. Grossman. 5 - The seaborne thermal coal market: volatile present and uncertain future. // In Woodhead Publishing Series in Energy. The Coal Handbook (Second Edition). Woodhead Publishing. 2023. Vol. 2. P. 167-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824327-5.00006-5>.
2. Slawomir Smiech, Monika Papiez, Kamil Fijorek. Causality on the steam coal market. // Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy. 2016. Vol. 11 (4). P. 328-334. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567249.2011.627909>.

3. Burton, J. Coal transition in South Africa. Understanding the implications of a 2°C-compatible coal phase-out for South Africa. // IDDRI & Climate Strategies. 2018. URL: [https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Rapport/20180609\\_Report\\_Coal\\_SouthAfrica.pdf](https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Rapport/20180609_Report_Coal_SouthAfrica.pdf).
4. Fernández Alvarez C. The Trading and Price Discovery for Coal. // In: Hafner, M., Luciani, G. (eds) // The Palgrave Handbook of International Energy Economics. Palgrave Macmillan. 2022. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86884-0\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86884-0_21).
5. IEA (2022). World Energy Outlook 2022. IEA. Paris. License: CC BY 4.0 (report). CC BY NC SA 4.0 (Annex A). URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
6. Yadav V.K., Gacem A., Choudhary N., Rai A., Kumar P., Yadav K.K., Abbas M., Khedher N.B., Awwad N.S., Barik D. Status of Coal-Based Thermal Power Plants, Coal Fly Ash Production, Utilization in India and Their Emerging Applications // Minerals. 2022. Vol. 12(12):1503. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12121503>.
7. Czupryński A., Adamiec J., Adamiak M., Żuk M., Kříž A., Mele C., Kciuk M. High-Temperature Corrosion of Flame-Sprayed Power Boiler Components with Nickel Alloy Powders. // Materials. 2023. Vol. 16(4): 1658. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16041658>.
8. Shcheglov Y. V., Fedorova N. V., Shaforost D. A. The abrasive properties of coal power plants ash and slag materials. // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 845–851. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.845>.
9. Parslow G.I., Stephenson D.J., Strutt J.E., Tetlow S. Investigation of solid particle erosion in components of complex geometry. // Wear. 1999. Vol. 233–235. P. 737-745. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00194-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00194-5).
10. Grishyn M.V., Tarakhtij O.S. Simulation modelling of sampling and replacement of coal suppliers for thermal power plants /Applied Aspects of Information Technology2023; Vol.6No.2:175–189 DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.13>
11. Maksym Grishyn. Modelling of automated steam coal transportation and enrichment systems for efficient operation and cost reduction of thermal power plants. // Scientific Collection «InterConf+». 2023. Vol 34(159). P. 271–285. DOI: <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.06.2023.027>.
12. Grishyn M.V. Wear control of heat exchange surface tubes of a TPP steam generator by means of automatic regulation of coal fuel abrasiveness. // Science and technology: problems, prospects and innovations. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2023. P. 143–153. URL: <https://sci-conf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-technology-problems-prospects-and-innovations-8-10-06-2023-osaka-yaponiya-arhiv/>.

## **Комп’ютерно-інтегрована система управління зносостійкістю поверхонь теплообмінних труб твердопаливних котлоагрегатів з розподілом потоків вугілля між керуючими впливами**

**М. В. Гршин, О. С. Тарахтій, Г. Й. Галантер**  
Національний університет «Одеська політехніка»

***Анотація.** У статті розглянуто проблему зносостійкості теплообмінних труб твердопаливних парових котлів, що є важливим аспектом підвищення ефективності та надійності енергетичного обладнання. Запропоновано комп’ютерно-інтегровану систему управління, яка враховує змінні параметри якості палива, зокрема його хімічний склад та абразивність. Використання такої системи дозволяє здійснювати моніторинг якості палива в режимі реального часу, що є критично важливим для мінімізації процесів ерозії та продовження терміну експлуатації котельного обладнання. Основною особливістю запропонованої моделі є використання двох незалежних каналів контролю якості твердого палива. Перший канал відповідає за визначення відповідності хімічного складу палива заявленим характеристикам, що дозволяє прогнозувати рівень утворення відкладень і забруднень. Другий канал здійснює аналіз вмісту абразивних частинок у димових газах після спалювання вугілля, що безпосередньо впливає на швидкість зношення теплообмінних поверхонь. Завдяки інтеграції цих двох підходів система забезпечує точне та адаптивне регулювання режимів роботи котла, мінімізуючи вплив низькоякісного палива на загальну продуктивність котлоагрегату. Запропонована система також включає математичну модель для оцінки довговічності теплообмінних труб залежно від характеристик палива та умов експлуатації. Реалізовано алгоритм розподілу*

потоків палива між основними керуючими впливами, що дає змогу оптимізувати процес горіння, зменшити зольність відходів та підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів. Результати імітаційного моделювання підтвердили ефективність розробленої системи: вдалося суттєво зменшити швидкість ерозії теплообмінних труб, оптимізувати споживання палива та знизити витрати на технічне обслуговування. Використання такого підходу дає змогу зменшити простої котельного обладнання, підвищити стабільність роботи енергетичних систем і знизити негативний екологічний вплив.

Запропонована система управління може бути використана як основа для подальшого вдосконалення автоматизованих рішень у сфері контролю зношування та ефективності роботи твердопаливних котлів. Її впровадження дозволить значно підвищити надійність енергетичних установок, знизити експлуатаційні витрати та продовжити термін їхньої служби, що є актуальним завданням для сучасної енергетики.

**Ключові слова:** твердопаливний паровий котел, якість твердого палива, комп'ютерно-інтегрована система управління, зносостійкість теплообмінних поверхонь, абразивність твердого палива.

Отримано 04.02.2025

### About the authors



**Maksym V. Grishyn**, Ph.D. in Engineering, Senior Lecturer at the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave.; Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: grishyn.m.v@opu.ua; ph.: +38 048 705 8374

**Гришин Максим Володимирович**, к. т. н., старший викладач кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка; 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: grishyn.m.v@opu.ua; тел.: +38 048 705 8374

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9268-8994>



**Olha S. Tarakhtiy**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: tarakhtij@op.edu.ua; ph.: +38 048 705 8374

**Таракhtій Ольга Сергіївна**, к. т. н., доцент кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка; 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: tarakhtij@op.edu.ua; тел.: +38 048 705 8374

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4266-3481>



**Gennady Io. Galanter**, Master's student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: gengalanter@stud.op.edu.ua, ph.: +38 048 705 8374

**Галантер Геннадій Йосипович**, магістрант кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: gengalanter@stud.op.edu.ua; тел.: +38 048 705 8374

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-3004-8000>

## Оцінка можливостей заряджання вантажних електричних автомобілів від фотоелектричних панелей

О. М. Бесараб, В. Я. Деревенко, С. В. Горковський  
Національний університет «Одеська політехніка»

**Анотація.** В роботі наведено основні електротехнічні характеристики вантажних електричних автомобілів для європейського ринку, їх зарядних станцій, а також відомості щодо середньодобового пробігу. Запропоновано варіанти оптимізації процесу заряджання електричних вантажівок, розглянуто перспективний екологічний спосіб заряджання шляхом встановлення фотоелектричної станції на логістичному об'єкті в Німеччині з виконанням розрахунку в онлайн-програмі Європейської комісії для аналізу сонячної енергії та проектування фотоелектричних систем.

**Ключові слова:** електрична енергія, фотоелектричні панелі, зарядна станція, електричні вантажні автомобілі, середньодобовий пробіг.

### Вступ

Повністю електричні вантажні автомобілі стають вже звичайними засобами доставки будь-чого в світі, з кожним роком зростає кількість вироблених автівок. Цей тип приводу вже охоплює усі можливі категорії вантажівок, тому виникає необхідність розробляти комплекси підходи для зручного, повністю або частково екологічного їх заряджання для дотримання сучасних та майбутніх вимог до екології.

### Мета дослідження

Визначити можливості сонячних фотоелектричних панелей виконувати зарядку вантажних електромобілів різних класів та режимів роботи.

### Матеріали та результати дослідження

Інформація про сучасний стан інфраструктури для вантажних електромобілів розглядається для країн ЄС, а саме Франції та Німеччини.

Згідно [1] тільки за 2 квартал 2024 року було придбано 335 вантажівок масою від 12 тон в Німеччині та 149 у Франції. У класі від 3,5 до 12 тон 728 та 412 одиниць відповідно. А середньорічний пробіг [2] складає у класі 3,5–12 тон 20–40 тис. км., а у класі від 12 тон, при добре розвинутій інфраструктурі 60–100 тис. км.. Кількість циклів зарядки може складати у малому класі 300–700, а у великому 300–500. Час звичайних логістичних операцій [3] складає від 30 хвилин до 2 годин під час яких автівка знаходиться у вимкненому стані. Отже, доцільно виконувати

цикли підзаряджання або повної зарядки під час цих операцій. Доцільно навести орієнтовні показники часу та потужності станцій [4,5] для автівок, раціональний тип зарядки, це від швидкої зарядки до ультрашвидкої. Потужності першої від 50 до 150 кВт, час зарядки близько 2–3 годин, другий тип потребує від 350 кВт для малотоннажних та від 1 МВт для середньотонажних електромобілів, але зарядка може тривати до години.

Інформація щодо марки і моделі вантажівки та дані щодо зарядної станції наведено в таблиці 1. Задля більш детального огляду узяті усі можливі за вантажопідйомністю типи автівок, які, зазвичай, використовуються у комерційних перевезеннях.

Під час аналізу доцільно розділяти автомобілі на дві категорії «легкі» та «важкі».

Поділ зарядних станцій для «легких» електромобілів (наприклад, Renault Kangoo, Mercedes-Benz Sprinter, тобто ті які використовуються для робіт по населеному пункту) і більших «важких» вантажівок (магістральні перевезення) може бути корисним з кількох точок зору, але це залежить від кількох факторів. Розглянемо плюси та мінуси такого підходу.

Перевагами поділу зарядних станцій є:

- 1) оптимізація інфраструктури;
- 2) поділ станцій допоможе уникнути конкуренції за ресурси та гарантувати, що кожен транспортний засіб отримує необхідну потужність без затримок;
- 3) спрощення процесів заряджання;
- 4) прискорення процесу заряджання.

Легкі комерційні автомобілі, такі як Kangoo та Sprinter, зазвичай мають менші батареї (наприклад, 33–50 кВт·год) і можуть заряджатися

Основні дані та характеристики вантажних електромобілів

№	Марка та модель	Заявлений пробіг на 1 заряді, км	Потужність зарядної станції, кВт	Рекомендована напруга до, В (DC)	Струм до, А (DC)
1	Volvo FH Electric	300-345	250	750	330
2	Mercedes eActros	300-400	160-400	800	500
3	Scania BEV Truck	250-300	375	750	500
4	MAN eTruck	500	до 500	1000	500
5	Renault Trucks E-Tech T	300	250	800	300
6	Mercedes-Benz eSprinter	150-400	115	400	288
7	Renault Master E-Tech	200	130	400	325
8	Renault Kangoo E-Tech	265	22	400	55
9	Ford E-Transit Custom	380	125	800	156
10	Citroën ë-Berlingo	280	100	400	250
11	Volkswagen ID. Buzz Cargo	400	170	800	213

з меншими потужностями (7,4 кВт для AC або 50–150 кВт для DC).

Великі вантажівки (наприклад, MAN eTruck, Mercedes-Benz eActros) вимагають значно більшої потужності для заряджання (до 350 кВт та вище).

Для легких автомобілів можна використовувати станції з меншими потужностями, які можуть бути встановлені на менших просторах, наприклад, на складах або в міських зонах, у той час як для великих вантажівок необхідні потужніші зарядні станції з великою кількістю простору для підключення та охолодження системи.

Майданчики, спеціально призначені для легких машин, можуть бути оснащені зарядними станціями з підходящою потужністю, що прискорить процес заряджання для таких автомобілів.

Недоліки поділу зарядних станцій:

- 1) витрати на інфраструктуру;
- 2) збільшення складності управління;
- 3) необхідність у додаткових майданчиках.

Поділ зарядних станцій може бути дорогим, оскільки потребує додаткового обладнання, наприклад різних типів зарядних пристроїв і допоміжної інфраструктури. Це збільшує вартість будівництва зарядних станцій та їх обслуговування.

Наявність кількох типів станцій вимагає від операторів складнішого управління інфраструктурою і може ускладнити логістику для користувачів, яким може знадобитися переміщатися між різними типами зарядних станцій.

Для поділу може знадобитися більше площі для встановлення зарядних пристроїв, що обмежує простір, особливо у містах із високою щільністю забудови.

Доцільно розділяти станції також коли на одній території базуються обидва типи автомобілів або робити окремі майданчики за територією.

Наступним питанням є отримання приблизних відомостей щодо можливих щоденних пробігів. Оскільки планується заміна автомобілів з двигунами внутрішнього згорання, то електричні автівки повинні виконувати ті ж самі обсяги роботи. Виходячи з відомостей щодо роботи класичних вантажівок [6-8] в таблиці 2 наведено дані про середній добовий пробіг автівок.

Таблиця 2

Відомості щодо пробігу

№	Вантажопідйомність, тони	Середній добовий пробіг, км
1	До 3,5	40–100
2	3,5–12	150–300
3	Більше 12	500–800

Отже, лише великотоннажним машинам, що виконують магістральні перевезення необхідна підзарядка за умови малої ємності акумуляторів. Доцільно сумістити перерву водія з заряджанням, тому ці станції доцільно будувати біля зон відпочинку далекобійників.

Кількість автівок у кожному гаражі може суттєво відрізнитись, але приблизне значення, яке можна узяти для виконання робіт з тестових, приблизних розрахунків, враховуючи дані з [9] можуть коливатись від 10 до 50 одиниць в залежності від розмірів міста та обсягів роботи.

Станції слід розділити за:

1. Типом користування:

- а) загального користування. Тобто скористатися може будь-який автомобіль;
- б) фірмового користування. Даний тип розташовується на території фірми перевізника для власного автопарку.

2. Живленням:

- а) тільки від сонячних панелей. Робота можлива лише за умов наявності необхідної кількості со-

нячної радіації, при наявності накопичувачів енергії;

б) комбіновані. З одним чи декількома джерелами живлення які повністю чи частково покривають потреби потужності. Дані джерела можуть бути класичного живлення від мережі оператора системи розподілу так і від інших відновлювальних джерел енергії (ВДЕ);

в) тільки інші види ВДЕ;

г) «класичні» від мережі оператора системи розподілу (розглядаються для порівняння).

3. Типом встановлення:

а) стаціонарні;

б) пересувні/мобільні;

в) для живлення мереж динамічної зарядки.

Розглянемо технічний бік реалізації проекту у локальному форматі. Оскільки цілком логічно, що локальні мережі створюють інший формат – місцевий. Розміщення фотоелектричних панелей на логістичних об'єктах – це сучасний та екологічно стійкий спосіб забезпечити енергією зарядні станції для вантажних електромобілів. Дане рішення стає все більш популярним та економічно вигідним з розвитком електротранспорту, зокрема вантажних автомобілів масою від 3,5 до 12 тон і більше, які вимагають значної кількості енергії для зарядки. Логістичні центри, як правило, мають великі дахи, що ідеально підходять для розміщення сонячних панелей. Така інфраструктура дозволяє не лише знизити витрати на електроенергію, а й скоротити вуглецевий слід, відповідаючи сучасним екологічним стандартам. Майже кожен логістичний об'єкт має крыту споруду: склад, цех тощо. На даху будівлі, де є вільна площа від розміщеного обладнання (системи вентиляції, кондиціонування, опалення тощо), може бути раціональним розмістити фотоелектричні панелі. Сучасна промисловість випускає панелі з вихідною потужністю близько 500 Вт та габаритними розмірами по довжині 2–2,5 метра та шириною 1–1,2 метри.

Розглянемо приклад логістичного об'єкта з дахом приблизним розміром 200 на 100 метрів. Площа даху становить 20000 м<sup>2</sup>, що дозволяє встановити близько 8000 фотоелектричних панелей потужністю 500 Вт кожна з огляду на необхідний простір для обслуговування та оптимального розміщення. З урахуванням стандартної ефективності та можливих втрат, така установка здатна виробляти пікову потужність від 2,8 до 3,2 МВт. Цього достатньо для зарядки кількох електровантажівок або підтримки роботи всієї енергетичної інфраструктури об'єкта.

Сонячні панелі потужністю 500 Вт мають розміри близько 2,3-2,5 м<sup>2</sup>. Кожна з них виробляє напругу близько 35-40 В і струм 12-15 А в умо-

вах стандартного тестування (STC). Для створення системи, що забезпечує зарядну станцію з параметрами 800 В і 250 А, панелі можна з'єднати в послідовні стрінги по 20 штук для досягнення необхідної напруги. Потім такі стрінги з'єднують паралельно для отримання потрібного струму. В даному випадку потрібно 25 стрінгів, що еквівалентно 500 панелей. Це приклад гнучкої конфігурації, що дозволяє адаптувати систему до потреб конкретної зарядної станції. Тобто на цьому комплексі є можливість встановлення до 16 зарядних постів.

При цьому сонячна енергія, що виробляється протягом дня, може використовуватися не тільки для безпосереднього заряджання електромобілів, але і для інших цілей. Надлишок енергії спрямовується в акумулятори для накопичення та зберігання або загальну електромережу. Накопичення важливо для забезпечення стабільності системи у похмурі дні чи вночі, коли сонячна генерація відсутня. Батареї великої ємності, які зазвичай застосовуються в таких системах, дозволяють накопичувати достатні об'єми енергії та ефективно її розподіляти.

Енергія, отримана від фотоелектричних панелей, може бути конвертована у потрібні параметри за допомогою інверторів та МРРТ-контролерів. Інвертори перетворюють постійний струм (DC) від панелей на змінний (AC), якщо це необхідно для живлення будівлі або обладнання. МРРТ-контролери оптимізують роботу сонячних панелей, дозволяючи системі завжди працювати на точці максимальної потужності.

Ще однією перевагою використання фотоелектричних панелей на логістичних об'єктах є їхня інтеграція в існуючу інфраструктуру. Завдяки компактним розмірам панелей їх встановлення не потребує значних змін конструкції даху чи інших частин будівлі. Це робить фотоелектричні панелі універсальним рішенням, яке можна запровадити практично на будь-якому логістичному об'єкті.

Таким чином, фотоелектричні панелі на дахах логістичних об'єктів є ефективним способом забезпечення енергією зарядних станцій для електровантажівок. Це дозволяє суттєво знизити залежність від зовнішніх джерел енергії, мінімізувати вуглецеві викиди та одночасно підвищити економічну ефективність підприємства. З урахуванням зростаючого попиту на екологічно чисті технології, подібні рішення стають невід'ємною частиною сталого розвитку логістики.

Перевіримо наші початкові приблизні розрахунки. Оскільки вирішено розглядати з аналітичної точки Німеччину та Францію, тому знайдемо в цьому регіоні споруду відповідних розмірів та

призначення. Наприклад, логістичний комплекс споруд кур'єрської фірми UPS в Німеччині біля міста Бутцбах поблизу Франції. (Рис. 1).

За допомогою онлайн сервісу Європейської комісії для аналізу сонячної енергії та проектування фотоелектричних систем [10] розраховано по місяцях кількість енергії, що генерується, враховуючи використання монокристалічних фотоелектричних панелей загальною потужністю 3 МВт. Величина втрат прийнята 14% (запропо-

новано системою). Вихідні дані для розрахунку наведені на рис. 2. а і рис. 2. б.

Отримані результати розрахунку, наведені на рис. 3, свідчать, що сумарна щомісячна генерація електроенергії фотоелектричною станцією, розташованою на даху логістичного комплексу, складає 100–400 тис. кВт·год. Найнижчий показник – 100 тис. кВт·год взимку у грудні, найбільший – 400 тис. кВт·год влітку у червні та липні.

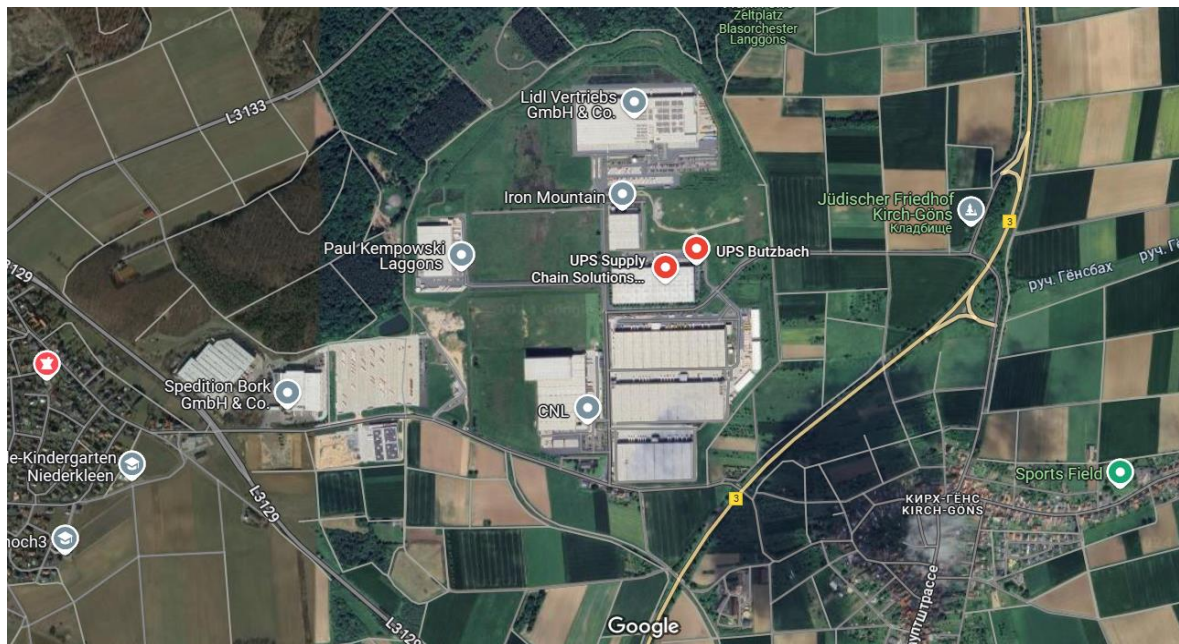
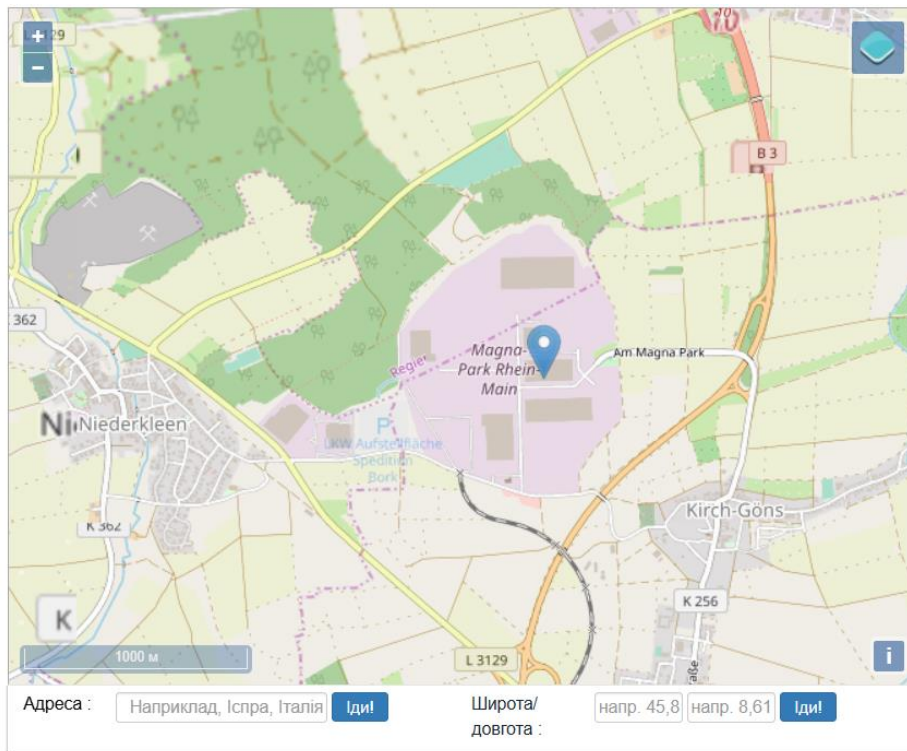


Рис. 1. Супутниковий знімок місцевості



а)

**Курсор:**

Вибрано : 50,477, 8,643

Висота (м): 260

PVGIS ver: 5.3

**Використовуйте тіні місцевості :**

Розрахунковий горизонт

Завантажити файл горизонту

---

МЕРЕЖА ПІДКЛЮЧЕНА

ВІДСТЕЖЕННЯ PV

OFF-GRID

МІСЯЧНІ ДАНІ

ЩОДЕННІ ДАНІ

ДАНИ ПОГОДИНИ

ТМУ

⚙️
**ЕФЕКТИВНІСТЬ ДО МЕРЕЖІ ПВ**
?

База даних сонячного випромінювання \*

PV технологія \*

Встановлена пікова фотоелектрична потужність [кВт] \*

Системні втрати [%] \*

**Стационарні варіанти кріплення**

Монтажне положення \*

Нахил [°] \*

Азимут [°] \*

Оптимізуйте нахил

Оптимізуйте нахил і азимут

Ціна фотоелектричної енергії

Вартість фотоелектричної системи (ваша валюта)

Відсотки [%/рік]

Тривалість життя [роки]

б)

Рис. 2. Вихідні параметри

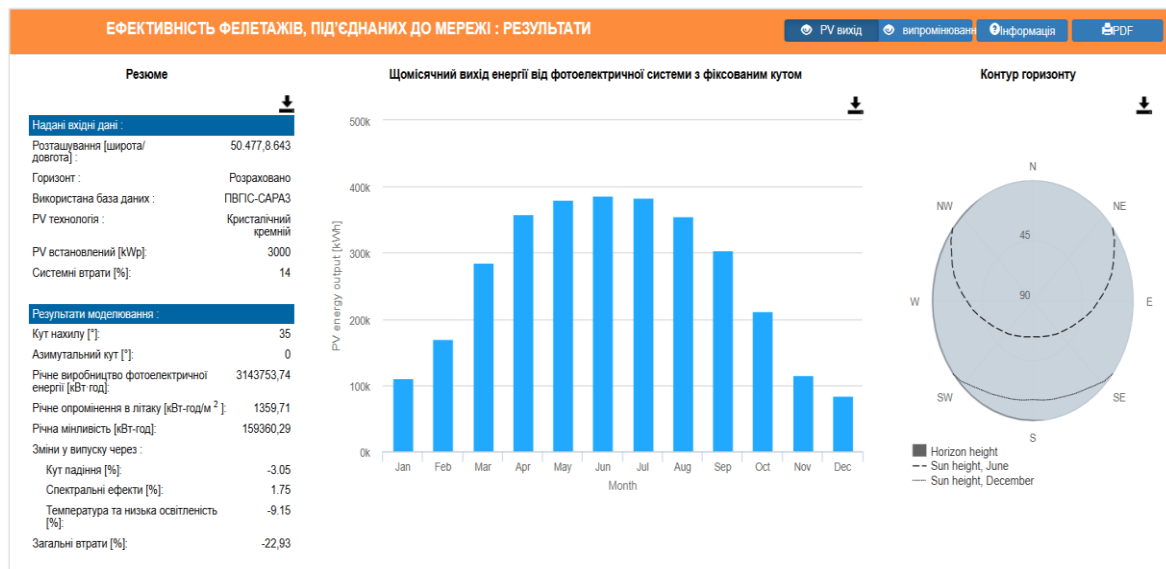


Рис. 3. Щомісячна генерація електроенергії від фотоелектричної системи

Таким чином, запропонована фотоелектрична станція взимку за місяць дозволяє виконати приблизно 2000 повних зарядок, це становить приблизно 6 автівок на добу. Влітку протягом доби є можливість зарядити до 24 автівок.

### Висновки

Розвиток і розповсюдження електричних вантажних автомобілів є незворотнім процесом, що потребує розробки нових комплексних підходів до їх заряджання з урахуванням екологічних ви-мог.

Перспективним екологічним способом забезпечити енергією зарядні станції для вантажних електромобілів є розміщення фотоелектричних панелей на логістичних об'єктах, цехах, торгових центрах та інших об'єктах з значною вільною площею даху. Запропоновану систему необхідно доповнити іншими джерелами живлення внаслідок значного коливання потужності, що генерується, через зміну погодних умов.

Розробка конкретних технічних рішень з впровадження запропонованих систем і визначення їх техніко-економічних показників є актуальним напрямком подальших досліджень.

**Список використаної літератури**

1. Sathvika Ananda, Alessia Musa, and Hussein Basma Race to Zero: Щоквартальний розвиток європейського ринку важких автомобілів (січень – червень 2024 р.) [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://theicct.org/publication/r2z-eu-hdv-market-development-quarterly-jan-june-2024-sept24>
2. Вантажні автомобільні перевезення за характеристиками маршрутів [Електронний ресурс]. Режим доступу [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road\\_freight\\_transport\\_by\\_journey\\_characteristics#](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_by_journey_characteristics#)
3. Скільки часу займає розвантаження вантажівки? [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://easyrelocated.com/how-long-does-it-take-to-unload-a-truck/>
4. Renault пропонує більше варіантів акумуляторів для електричних вантажівок [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://www.electrive.com/2020/12/01/renault-offers-more-battery-options-for-its-e-trucks/>
5. Електричні вантажівки: скільки місць для швидкої зарядки потрібно в Європі? [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://www.isi.fraunhofer.de/en/presse/2024/presseinfo-20-e-lkw-schnellladestationen-europa.html>
6. Порівняння водневої і акумуляторної електровантажівки. Методологія та основні припущення. [Електронний ресурс]. Режим доступу [https://tecdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2020\\_06\\_TE\\_comparison\\_hydrogen\\_battery\\_electric\\_trucks\\_methodology.pdf](https://tecdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2020_06_TE_comparison_hydrogen_battery_electric_trucks_methodology.pdf)
7. Steffen Link, Patrick Plötz, Технічна здійсненність важких акумуляторних електричних вантажівок для міських і регіональних перевезень у Німеччині - практичний приклад із реального світу. *World Electr. Veh. J.* 2022, 13(9), 161; <https://doi.org/10.3390/wevj13090161>
8. Вантажні автомобільні перевезення за характеристиками транспортних засобів [Електронний ресурс]. Режим доступу [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Road\\_freight\\_transport\\_by\\_vehicle\\_characteristics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Road_freight_transport_by_vehicle_characteristics)
9. Глобальний ринок управління автопарком – тенденції галузі та прогноз до 2031 року [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-fleet-management-market?srsId=AfmBOopnKoI-AWfHHCc6TbvrGcNIhyd7zuGFIGNQQ7FzZG5LBmrBoxgF>

10. ФОТОЕЛЕКТРИЧНА ГЕОГРАФІЧНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА [Електронний ресурс]. Режим доступу [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

**References**

1. Sathvika Ananda, Alessia Musa, and Hussein Basma Race to Zero: European Heavy Duty Vehicle Market Development Quarterly (January – June 2024), available at <https://theicct.org/publication/r2z-eu-hdv-market-development-quarterly-jan-june-2024-sept24/>
2. Road freight transport by journey characteristics, available at [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road\\_freight\\_transport\\_by\\_journey\\_characteristics#](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_by_journey_characteristics#)
3. How long does it take to unload a truck?, available at <https://easyrelocated.com/how-long-does-it-take-to-unload-a-truck/>
4. Renault offers more battery options for electric trucks, available at <https://www.electrive.com/2020/12/01/renault-offers-more-battery-options-for-its-e-trucks/>
5. Electric trucks: How many fast-charging locations are needed in Europe?, available at <https://www.isi.fraunhofer.de/en/presse/2024/presseinfo-20-e-lkw-schnellladestationen-europa.html>
6. Comparison of hydrogen and battery electric trucks Methodology and underlying assumptions, available at [https://tecdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2020\\_06\\_TE\\_comparison\\_hydrogen\\_battery\\_electric\\_trucks\\_methodology.pdf](https://tecdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2020_06_TE_comparison_hydrogen_battery_electric_trucks_methodology.pdf)
7. Link, S.; Plötz, P. Technical Feasibility of Heavy-Duty Battery-Electric Trucks for Urban and Regional Delivery in Germany—A Real-World Case Study. *World Electr. Veh. J.* 2022, 13, 161. <https://doi.org/10.3390/wevj13090161>
8. Road freight transport by vehicle characteristics, available at [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Road\\_freight\\_transport\\_by\\_vehicle\\_characteristics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Road_freight_transport_by_vehicle_characteristics)
9. Global Fleet Management Market – Industry Trends and Forecast to 2031, available at <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-fleet-management-market?srsId=AfmBOopnKoI-AWfHHCc6TbvrGcNIhyd7zuGFIGNQQ7FzZG5LBmrBoxgF>
10. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, available at [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

## Assessment of the possibilities of charging electric trucks from photoelectric panels

O. Besarab, V. Derevenko, S. Horkovskyi  
Odessa Polytechnic National University

**Abstract.** *The work examines the potential of using solar photovoltaic panels to charge freight electric vehicles of various classes and operating modes. It delves into the key electrical characteristics of freight vehicles manufactured for the European market, including: range per charge, charging device power, voltage, and current as recommended by the manufacturer. To facilitate a comprehensive analysis, the study categorizes vehicles based on their carrying capacity, ranging from small commercial vans to semi-trailers designed for long-haul transportation. The research proposes several strategies for optimizing the charging process, highlighting both their advantages and drawbacks. One approach involves dividing the charging time for large vehicles during the day and smaller vehicles at night. Another strategy suggests allocating separate charging areas for different vehicle types. The study presents a theoretical case study involving the installation of a charging station at a logistics facility belonging to the UPS courier company in Germany. This case study utilizes the European Commission's online program for solar energy analysis and photovoltaic system design to perform relevant calculations. It is shown that photovoltaic panels on the roofs of logistics facilities are an effective way of providing energy to charging stations for electric trucks. This makes it possible to significantly reduce dependence on external energy sources, minimize carbon emissions and simultaneously increase the economic efficiency of the enterprise.*

**Keywords:** *electricity, photovoltaic panels, charging station, electric trucks, average daily mileage.*

Отримано 12.02.2025

### Про авторів



**Бесараб Олександр Миколайович**, к. т. н., професор, завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: besarab@op.edu.ua; тел. + 38 048 705 8512

**Oleksadr Besarab**, Ph.D., Professor, Head of the Department of the Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: besarab@opu.ua; ph.: + 38 048 705 8512

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4170-8294>



**Деревенко Владлен Янович**, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: vl.de@stud.op.edu.ua; тел.: + 38 048 705 8567

**Vladlen Derevenko**, graduate student of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: vl.de@stud.op.edu.ua; ph.: + 38 048 705 8567

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-3005-1997>



**Горковський Сергій Вікторович**, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: 4692120@as.op.edu.ua; тел.: + 38 048 705 8567

**Serhii Horkovskyi**, graduate student of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; Shevchenko Avenue, 1, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: 4692120@as.op.edu.ua; ph.: + 38 048 705 8567

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0009-0003-6037-9884>